

DETERMINACIÓN DE MODOS DE FALLO Y SUS EFECTOS EN MÁQUINAS DE LA INDUSTRIA PETROQUÍMICA



PROYECTO FIN DE CARRERA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Tutores Empresa (Repsol): José Javier Sanz Clemente
César Fernández Valdés

Tutora Universidad: Maria Belén Muñoz Abella

MARZO 2009

JAIME SALVADÓ RUIZ

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quería agradecer a mis tus tutores la disponibilidad que han tenido para orientarme en el proyecto. Por un lado, a José Javier y César, ya que siendo un momento de mucha carga de trabajo para la empresa, han sabido dirigirme el proyecto. Y por otro lado a Belén, que nunca me puso ningún problema y me solucionó mis dudas con gran celeridad.

En segundo lugar quería agradecer a mis padres todas las facilidades que me han dado a lo largo de estos años. Desde pequeño me han educado, y transmitido la importancia de tener una buena formación académica; y siempre me han ayudado y animado a alcanzar mis metas. Mi hermana también ha sido un referente para mí, y he de reconocer que todo ha sido mucho más fácil teniéndola por delante. También quería hacer una mención especial a mi abuela, ella siempre se ha interesado en cómo iba con los estudios, siempre se ha preocupado y me ha animado en los momentos duros, además de la ayudita económica que me daba, que he de reconocer no me ha venido nada mal.

También quería agradecer a mis amigos Javi, Luis y Carlos, así como al equipo de fútbol (con animadoras incluidas), los ratos de ocio que me han servido para desconectar de la rutina universitaria, haciéndome ver las grandezas de la amistad y las diversiones de la vida día a día y noche a noche.

Por último, también quería hacer una mención a mis compañeros de la universidad. Como todos sabemos, han sido años de mucho trabajo y finalmente entre todos haciendo piña y remando en un mismo sentido hemos sido capaces de superar lo que en primero veíamos imposible. A pesar ello, no todo ha sido trabajo y sudores en la universidad. Todos lo viajes a Gandía, París e incluso Andorra (me ha costado mucho tiempo decidir si poner este por las risas que suscitaría), han sido fantásticos y gracias a ellos he podido conocer y aprender un poco de cada uno de vosotros. Espero y deseo no perder el contacto con ninguno y podamos recordar, de aquí a unos años, las innumerables e interminables partidas al "Slime", "Crazy Mamutts", "Sexy football", Bumper Ball, .., entre otros juegos, así como las comidas de la uni, y demás anécdotas con los profesores.

A todos vosotros tengo una parte reservada en mi corazón.

MUCHAS GRACIAS A TODOS.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	MOTIVACIÓN	6
1.2	OBJETIVOS	6
1.3	ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	6
2	REFINERÍA	8
2.1	UNIDADES PRINCIPALES DE UNA REFINERÍA	10
2.2	MÁQUINAS Y COMPONENTES DE UNA REFINERÍA	16
2.2.1	COMPRESORES.....	17
2.2.1.1	Compresores centrífugos	18
2.2.1.2	Compresores alternativos	20
2.2.1.3	Compresores de anillo líquido	23
2.2.1.4	Esquema del equipo de compresión	24
2.2.2	BOMBAS.....	25
2.2.2.1	Bombas centrífugas	25
2.2.2.2	Bombas alternativas.....	26
2.2.2.3	Bombas dosificadoras.....	27
2.2.2.4	Esquema del equipo de una bomba.....	27
2.2.3	TURBINAS.....	28
2.2.3.1	Turbinas de vapor	28
2.2.3.2	Turbinas de gas	29
2.2.4	VENTILADORES (Y SOPLANTES)	31
2.2.5	REDUCTORES DE VELOCIDAD	32
2.2.6	AGITADORES.....	33
3	LA SEGURIDAD INDUSTRIAL EN UNA REFINERÍA.....	34
3.1	CAPAS DE PROTECCIÓN	34
3.2	GESTION DEL RIESGO	38
3.2.1	IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS	38
3.2.1.1	Técnicas de identificación de peligros	38
3.2.2	VALORACIÓN DEI RIESGO	44
3.2.2.1	Técnicas de Análisis de Riesgo.....	45
4	ESTUDIO DE MODOS DE FALLO Y NIVEL DE CONSECUENCIAS.....	55
4.1	DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO	55
4.2	ANÁLISIS DE LOS FALLOS	55
4.2.1	Estudio de Compresores.....	55
4.2.1.1	Unidad Hidrodesulfuradora de gasoleo.	55
4.2.1.2	Unidad de Gascon de destilación.....	73
4.2.1.3	Unidad de Hidrocracker.....	92
4.2.1.4	Unidad de Gascon de Coquer.....	112
4.2.1.5	Unidad de Recuperación de gases de Antorcha Dulce.....	134
4.2.2	Estudio de Bombas	156
4.2.2.1	Unidad de Hidrocracker.....	156
4.2.2.2	Unidad de Coquer.....	174
4.2.3	Estudio de Turbinas	183

5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	185
6	BIBLIOGRAFÍA	188
	ANEXO I (REPRESENTACIÓN DE LOS P&IDS).....	189
	ANEXO II (ESTUDIO DE PROBABILIDAD DE FALLOS INTERNOS EN COMPRESORES).....	203

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Representación de una Refinería Tipo.....	8
Figura 2.- Oleoducto	9
Figura 3.- Esquema de una refinería	10
Figura 4.- Esquema de la Unidad de Topping.	11
Figura 5.- Esquema de la Unidad de Vacío.....	13
Figura 6.- Esquema de la Unidad de Hidrocracker.....	13
Figura 7.- Esquema de la Unidad de Coquer.	14
Figura 8.- Tipología de compresores.....	17
Figura 9.- Partes de un Compresor centrífugo	18
Figura 10.- Representación interna de un compresor centrífugo.....	18
Figura 11.- Difusores de compresores centrífugos.....	19
Figura 12.- Ejemplo 1 de compresores centrífugos	19
Figura 13.- Ejemplo 2 de compresores centrífugos	19
Figura 14.- Funcionamiento interno de un compresor alternativo.....	20
Figura 15.- Interior de un compresor alternativo.....	20
Figura 16.- Ciclo de compresión.....	21
Figura 17.- Etapas del ciclo de un compresor alternativo	22
Figura 18.- Ejemplo de compresor alternativo	22
Figura 19.- Esquema de funcionamiento de compresor de anillo líquido.....	23
Figura 20.- Ejemplo de compresor de anillo líquido.....	24
Figura 21.- Equipo de un compresor	24
Figura 22.- Ejemplo de Bomba centrífuga	25
Figura 23.- Ejemplo de bomba alternativa.....	26
Figura 24.- Ejemplo 1 de bombas dosificadoras digitales.....	27
Figura 25.- Ejemplo 2 de bombas dosificadoras digitales.....	27
Figura 26.- Equipo de una bomba	27
Figura 27.- Esquema de funcionamiento de una turbina de vapor.....	28

Figura 28.- Ejemplo de turbina de vapor	29
Figura 29.- Ciclo Brayton ideal	30
Figura 30.- Ejemplo de turbina de gas.....	30
Figura 31.- Ejemplo de un ventilador (soplador).....	31
Figura 32.- Ejemplos de reductoras de velocidad.....	32
Figura 33.- Ejemplo agitador	33
Figura 34.- Capas de protección de una instalación.....	34
Figura 35.- Diagrama de flujo de un HAZOP	41
Figura 36.- Posibles parámetros desviatorios.....	42
Figura 37.- Matriz de riesgo	45
Figura 38.- Niveles de riesgo	46
Figura 39.- Gráficas de riesgo para las personas.....	53
Figura 40.- Gráficas de riesgo para el medio ambiente	53
Figura 41.- Gráficas de riesgo para las instalaciones y la producción.	53
Figura 42.-Representación del Demister en un depósito	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Comparativa entre compresores Alternativos y Centrífugos	23
Tabla 2.- Tabla tipo de HAZOP	44
Tabla 3.- Probabilidad de fallo de cada SIL.....	47
Tabla 4.- Crédito de las capas de protección independiente típicas	49
Tabla 5.- Frecuencia de escenarios peligrosos	51
Tabla 6.- Ficha SIL de Datos generales	54
Tabla 7.- Ficha SIL ante Fallo peligroso en demanda	54



1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

Debido a las graves consecuencias que un fallo de una máquina de la industria petroquímica pueden ocasionar a los operarios, al medio ambiente y a las instalaciones; es de vital importancia la realización de un estudio de seguridad que permita identificar los peligros, evaluar los riesgos e incorporar las salvaguardas necesarias que permita operar en las mejores condiciones de seguridad.

Como más adelante se explicará, los fallos internos a las máquinas han sido ampliamente estudiados por sus fabricantes, sin embargo surge la necesidad de analizar las consecuencias que una desviación del proceso puede provocar en una máquina situada en una instalación industrial.

Conociendo las causas y las consecuencias de un fallo en una máquina es más sencillo evitarlo, y poder introducir las salvaguardas adecuadas para prevenir este fallo de la máquina. Estas salvaguardas deben ser apropiadas al riesgo existente y deben permitir alcanzar a su vez altos niveles de disponibilidad de la planta. La inversión necesaria y los costes de mantenimiento, tienen que ser consecuentes con el riesgo que previenen o mitigan, de forma que los recursos económicos se inviertan allí donde es más necesario para la seguridad.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo de la memoria consiste en la obtención de un catálogo o listado, donde quede reflejado el comportamiento de las principales máquinas de una refinería ante las desviaciones más frecuentes de proceso.

Dicho listado, a modo de base de datos, será empleado en un futuro por la empresa, para determinar el nivel de seguridad que se le debe asignar a cada máquina, a partir de las funciones instrumentadas asociadas a las mismas, ya que son las encargadas de realizar una función concreta cuando el proceso abandona el régimen normal de trabajo y aparece un riesgo potencial.

1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento realiza una breve introducción sobre el funcionamiento de una refinería, los productos con los que trata, sus principales disposiciones geográficas y los métodos de transporte de sus productos.

Seguidamente se analizará un esquema de una refinería tipo, explicando su disposición, así como los objetivos y productos con los que trabajan las principales unidades en las que se divide.

A continuación se identifican los distintos grupos de componentes o equipos de procesos de una refinería, como son las máquinas dinámicas, la calderería, los equipos eléctricos y los equipos de intercambio de calor. El estudio se centra en el análisis de los



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

equipos dinámicas (compresores, bombas y turbinas), de las que se detallará sus tipos, funcionamiento y características principales.

Después se introducirá el análisis de riesgos de proceso, donde se explicará detenidamente las principales técnicas empleadas en la industria petroquímica para detectar y prevenir peligros (HAZOP, FMEA); así como las técnicas de evaluación de riesgos (Asignación del SIL).

Una vez realizada la introducción necesaria para la comprensión de las técnicas utilizadas en el estudio, se realiza el análisis HAZOP de la maquinaria crítica de unas unidades determinadas y la determinación del SIL de sus funciones instrumentadas asociadas; para poder crear un listado donde queden reflejados los daños concretos que sufrirían dichas máquinas, ante los fallos de proceso típicos producidos, así como los medios de prevención.

Finalmente se añadirá un apartado de conclusiones acerca del estudio realizado y unas alternativas de trabajos futuros a realizar en este campo.

2 REFINERÍA

El petróleo se trata de una mezcla compleja no homogénea de hidrocarburos insolubles en agua. Su origen es orgánico, fósil, fruto de la transformación de materia animal y vegetal procedente del plancton y algas, que se depositaron en grandes cantidades en fondos oceánicos bajo condiciones de escasez de oxígeno.

Las refinerías, como la mostrada en la *figura 1*, surgen como la necesidad de comercializar este petróleo o crudo que se obtiene directamente de las pozos petrolíferos, imposible de ser vendido directamente después de su extracción. Por lo tanto, el crudo debe necesariamente sufrir una serie de transformaciones, diferentes en muchos casos; ya que dependiendo del origen del mismo, sus características pueden variar sustancialmente en cuanto a estado, densidad, poder calorífico, viscosidad, contenido en azufre y calidad entre otras.

Por ello, la operación de cada refinería debe adaptarse a las características del crudo que procesa, por lo que a la hora de diseñar una refinería, se debe estudiar a conciencia, la procedencia del crudo y sus propiedades principales.



Figura 1.- Representación de una Refinería Tipo

En países más industrializados se requiere de una gran variedad de productos procedentes del petróleo con elevadas especificaciones de calidad. Esto supone una gran exigencia a la industria petroquímica que obviamente redundará en una mayor complejidad. Mientras que por el contrario, en países menos desarrollados hay una menor exigencia en cuanto a calidad de producto.

Generalmente las refinerías están situadas próximas a la costa de cada uno de los países, en España por ejemplo, tenemos refinerías en Tarragona, Cartagena, La Coruña,

La Rábida, Algeciras y Castellón entre otras. Gracias a esta distribución, se permite reducir los costes de transporte, tratando directamente el crudo procedente de buques de petróleo.

Existen algunas excepciones concretas en las que la ubicación de las refinerías se sitúa en zonas más interiores geográficamente y salvan los problemas de transporte por medio de oleoductos, como el mostrado en la *figura 2*, o en gaseoductos. (Ejemplo: Refinería de Puertollano en España).



Figura 2.- Oleoducto

2.1 UNIDADES PRINCIPALES DE UNA REFINERÍA

A continuación, en la *figura 3*, se muestra un posible esquema tipo de producción de una central de refino.

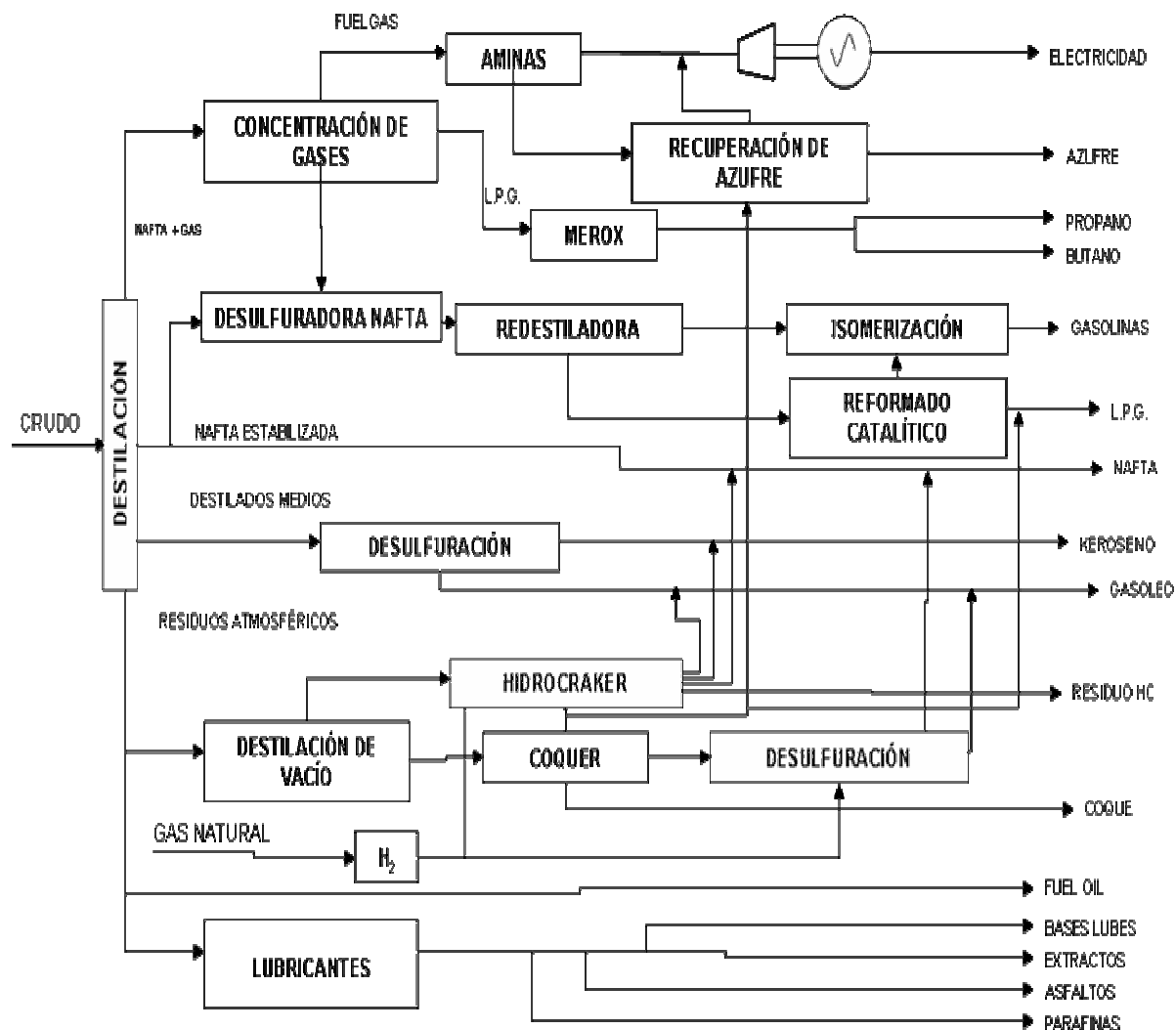


Figura 3.- Esquema de una refinería

Como se ha indicado anteriormente, no todas las refinerías tienen este esquema de producción, ya que dependiendo de las especificaciones de los productos y del tipo de crudo a destilar, existen numerosas variedades.

Seguidamente se introduce brevemente el objetivo de las principales unidades dentro del esquema de producción de una refinería tipo mostrado en la *Figura 3*.

Las principales unidades son:

➤ Unidad de Topping (o Destilación Atmosférica)

La Unidad de Topping o Destilación atmosférica del crudo, mostrada en *figura 4*, es la primera operación de procesamiento que se realiza. Los objetivos que se desean cumplir en esta unidad son:

- Separar, mediante destilación, distintas fracciones del crudo en función de su rango de ebullición. Estas pueden ser ya utilizados comercialmente en algunos casos (Nafta Petroquímica), o deben ser tratados posteriormente en otras unidades hasta conseguir las características (especificaciones) necesarias para su venta.
- Reducir el contenido de sales disueltas (cloruro sódico y magnesio fundamentalmente) del crudo y evitar daños por corrosión a las instalaciones situadas en la refinería.

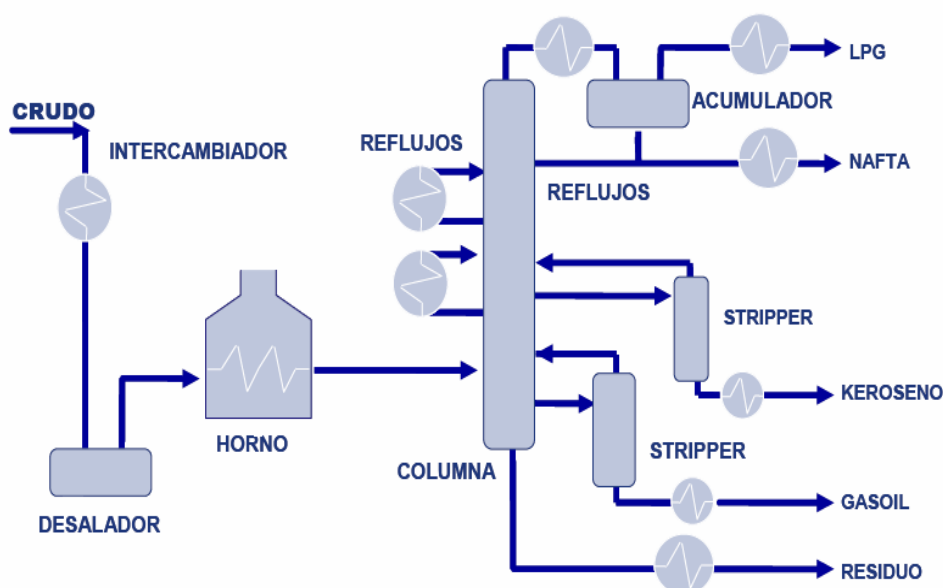


Figura 4.- Esquema de la Unidad de Topping.

➤ Unidad de concentración de gases (GASCON)

Esta unidad recibe naftas de elevada tensión de vapor, para estabilizarlas. También se envían allí las corrientes gaseosas de las diferentes plantas, para fraccionarlas en sus componentes principales. Además de las naftas estabilizadas, se obtienen también propanos y butanos, tratados para controlar su acidez y contenido de azufre. La corriente de gas residual puede destinarse a uso petroquímico, o en caso de no existir demanda para ello como combustible de la refinería.

➤ Unidad de Regeneración de Aminas

El sulfhídrico contenido en el gas de reciclo y en el fuel-gas producto, es absorbido con amina en contracorriente en dos columnas para producir un gas denominado “dulce” o que carece de azufre. La amina es regenerada en otra columna mediante aporte de calor, donde se produce la desorción de gas ácido, que sale por cabeza y se envía a las plantas de recuperación de azufre.

➤ Planta de Recuperación de Azufre

Tratan los gases ricos en H_2S procedentes de las unidades regeneradoras de aminas y de la planta de aguas ácidas para la obtención de azufre elemental. De este



modo se eliminarán los compuestos de azufre de las corrientes, eliminando su impacto en el medio ambiente, y permitirá su aprovechamiento como azufre elemental en otras industrias.

➤ Unidad de Merox LPG

Se trata de un proceso de eliminación de SH_2 y mercaptanos existentes en los gases de refinería.

➤ Unidad de Hidrotratamiento de Nafta de Coquer

Aquí se hidrogena la nafta producida en la unidad de Coquer tras su paso por la unidad de concentración de gases, con el fin de eliminar el contenido en diolefinas y minimizar el de olefinas y azufre.

➤ Unidad de Isomerización

La principal aplicación es la de conversión de un hidrocarburo de cadena lineal o parafina, en uno de sus isómeros ramificados con el objetivo de mejorar su número de octano.

➤ Unidad de Reformado Catalítico

En las unidades de reformado catalítico se modifican las cadenas de hidrocarburos para mejorar las características de las fracciones de naftas pesadas. Están integradas por sus respectivas hidrodesulfuradoras para eliminar azufre, y tienen por objeto elevar el número de octano de la nafta pesada que se ha obtenido durante la destilación del crudo, obteniendo productos base para la formulación de las gasolinas.

➤ Unidad de Desulfuración de Gasoil

El objetivo de esta Unidad de desulfuración de Gasoil es el de hidrogenar el gasoil producido en la unidad de Topping con el fin de eliminar el contenido en diolefinas y minimizar el de olefinas y azufre hasta límites que permitan su comercialización.

➤ Unidad de Vacío (Destilación de Vacío)

La función que la Unidad de Destilación a Vacío, tiene en el esquema de una refinería, es la de producir destilados de alto punto de ebullición, libres de contaminación de metales y asfáltenos, que permitan su procesamiento posterior en unidades de conversión. Para poder efectuar esta operación es necesario operar a presión por debajo de la atmosférica para evitar la descomposición de los productos a elevada temperatura.

En la *figura 5* se muestra un pequeño esquema de esta unidad.

➤ **Unidad de Coquización Retardada (Coquer)**

El principal objetivo de la Unidad de Coquización Retardada, como la mostrada en la *figura 7*, es el de reducir la producción de fuelóleos para adaptarse a la demanda del mercado, produciendo mediante un proceso de craqueo térmico severo, hidrocarburos más ligeros. Con esta unidad se puede llegar a un esquema con producción cero de fuelóleos. Además permite reducir el contenido de azufre de las corrientes de refinería.

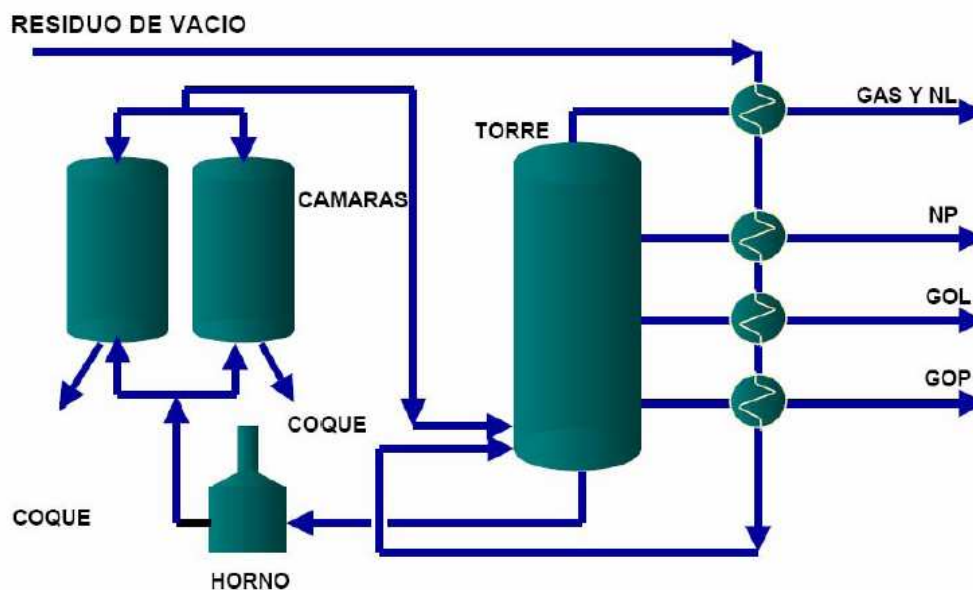


Figura 7.- Esquema de la Unidad de Coquer.

➤ **Unidad de Desulfuración de Gasoil de Coquer**

El objetivo es el de hidrogenar el gasoil ligero producido en la unidad de Coquer con el fin de eliminar el contenido en diolefinas y minimizar el del olefinas y azufre.

➤ **Unidad de Hidrogenación de Butadieno**

El objetivo de esta unidad es el de producir hidrotratamiento selectivo de butadieno, para cumplir la especificación comercial de máximo contenido de diolefinas y acetilenos.

➤ **Planta de producción de Hidrógeno**

Esta es una unidad que se instala debido a la elevada necesidad de H_2 que unidades como el Hidrocracker y Desulfuradotas requieren.

➤ **Unidad de Lubricantes**

El residuo de la destilación atmosférica, llamado crudo reducido, se continúa fraccionando bajo vacío para seguir separando distintas fracciones sin modificar su estructura química, obteniendo cortes básicos para la elaboración de lubricantes.



Este residuo es refinado con un solvente en la **unidad de Desasfaltado**, donde se mezcla con propano líquido, para separar las resinas asfálticas. Luego se separa el propano del aceite y del asfalto. Posteriormente, se realiza la **Refinación con furfural** (sustancia que se mezcla en parte con el aceite mineral) donde se procesan, agitándolas, las diferentes bases, que salen por la parte superior, tras haber sido eliminados los compuestos aromáticos indeseables. Inmediatamente se realiza la separación del furfural utilizado. El paso posterior en la elaboración de lubricantes es la eliminación de parafinas (**Desparafinado**) que se realiza con solventes especiales a baja temperatura. Los solventes utilizados son Tolueno y Metil-etil-cetona.

El aceite así tratado luego es filtrado y refrigerado. Seguidamente se recupera el solvente disuelto en ambas fases: aceite y parafina. Libre de compuestos aromáticos y parafinas, la base es enviada al **Hidroterminado catalítico**, donde se pone en contacto al aceite con gas hidrógeno en presencia de un catalizador adecuado.

➤ **Unidad de Stripper de Aguas Ácidas**

Las aguas procedentes de los diferentes lavados de las unidades, absorben sales, sulfhídrico y amoníaco, por lo que han de ser procesadas para la eliminación de estos gases antes de su envío a la planta de Tratamiento de Aguas de la Refinería.

➤ **Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (TAR)**

El objetivo de esta planta es tratar los efluentes líquidos para ser vertidos al exterior (río, mar) dentro de los límites medioambientales permitidos.

➤ **Unidad recuperadora de gases de antorcha**

El objetivo de esta unidad es la recuperación de gases de antorcha procedentes de las descargas de diversas unidades de proceso, mediante un tratamiento de endulzamiento consistente en una absorción con amina como disolvente, para una posterior reutilización de estos gases como fuel gas de baja presión.



2.2 MÁQUINAS Y COMPONENTES DE UNA REFINERÍA

Antes realizar el análisis y estudio de los equipos de una refinería, se presenta una clasificación de estos dentro de 4 grandes grupos principalmente:

MÁQUINAS DINÁMICAS

- Compresores
- Bombas
- Turbinas
- Ventiladores
- Reductores de velocidad
- Agitadores

CALDERERÍA

- Recipientes a presión
- Tanques de almacenamiento

ELECTRICIDAD

- Motores eléctricos
- Transformadores
- Cuadros de distribución
- Generadores

EQUIPOS DE INTERCAMBIO DE CALOR

- Hornos
- Calderas
- Intercambiadores de calor

Una vez clasificados los principales equipos de una refinería, el estudio de seguridad en cuanto al análisis de modos de fallo y consecuencias, se centrará principalmente en los equipos dinámicos y esencialmente en los compresores, en las bombas y en las turbinas.

2.2.1 COMPRESORES

Un compresor es un equipo dinámico utilizado para incrementar la presión de un fluido compresible. El nivel de presión en la aspiración y en descarga puede ser muy variable, desde niveles atmosféricos hasta valores muy elevados.

La presión de entrada y salida están relacionadas, dependiendo del tipo de compresor y de su configuración. El fluido de trabajo puede ser cualquier gas compresible, tanto gas como vapor, y puede tener un amplio rango de peso molecular.

Las aplicaciones de los gases compresibles varían en función de las necesidades, desde productos consumibles, como por ejemplo la refrigeración de una casa; hasta grandes y complejas instalaciones petroquímicas donde se requiere suministrar gas a una determinada presión para la correcta producción de una reacción determinada.

Las aplicaciones más comunes de los compresores son:

- ❖ Separación de aire
- ❖ Extracción de vapor
- ❖ Alimentar la red de aire comprimido necesaria para instrumentación
- ❖ Proveer de aire a una determinada presión para la combustión en hornos y calderas.
- ❖ Producir condiciones idóneas de presión para que se produzca una reacción química
- ❖ Producir y mantener niveles de presión adecuados por razones de proceso en equipos

A continuación en la *Figura 8*, se muestra un esquema de la tipología de los compresores utilizados en la industria petroquímica.

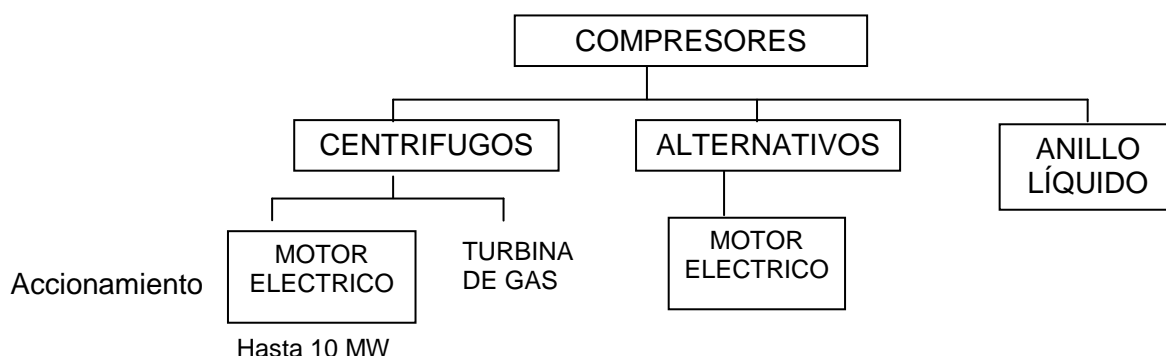


Figura 8.- Tipología de compresores

2.2.1.1 Compresores centrífugos

El compresor centrífugo es una turbomáquina formado por un rotor giratorio que trabaja dentro de una carcasa provista de dos aberturas, una para la aspiración y otra para la descarga del fluido. El fluido entra en el compresor en dirección axial próximo al eje de giro del rotor y es impulsado por la fuerza centrífuga en dirección radial. El rotor es el elemento encargado de convertir la energía mecánica de rotación del eje, en cantidad de movimiento y por tanto energía cinética aplicada al fluido. A la salida, este fluido a gran velocidad es tomado por el difusor donde se transforma la energía cinética del fluido, en energía potencial en forma de presión, completando así la escala de conversión de energía.

Las principales partes internas de un compresor centrífugo se pueden observar a continuación en la *figura 9*.

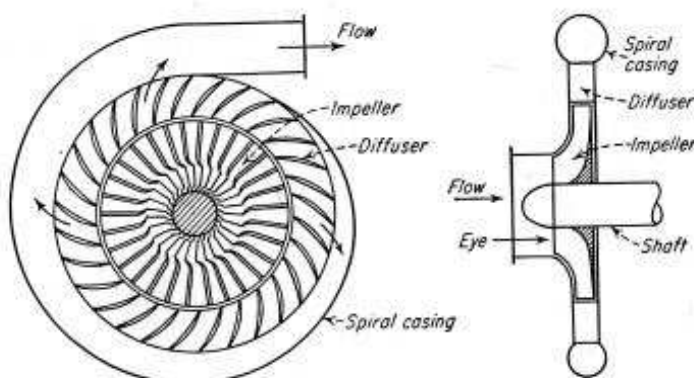


Figura 9.- Partes de un Compresor centrífugo

En la *figura 10*, se representa la estructura interna de un compresor centrífugo tipo.

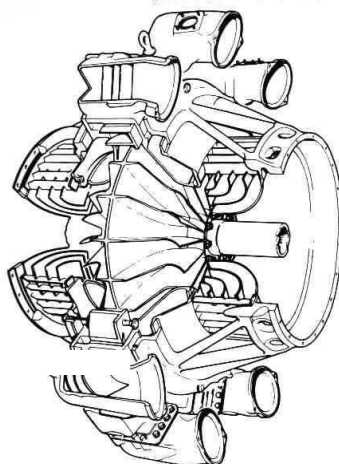


Figura 10.- Representación interna de un compresor centrífugo

Como se ha indicado anteriormente, el papel que desempeña el difusor transformando la energía cinética en potencial (presión), resulta fundamental en el funcionamiento de los compresores centrífugos. Este difusor puede tener forma de alabes o de caracol, como se muestran en la *figura 11*.

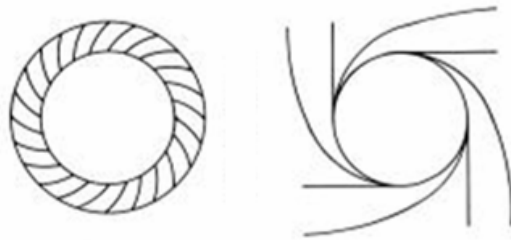


Figura 11.- Difusores de compresores centrífugos

Históricamente, el accionamiento más utilizado para los compresores centrífugos ha sido la turbina de vapor. Con el desarrollo de la energía, los motores eléctricos han recibido un mayor grado de atención. En cuanto eficiencia energética se refiere, el accionamiento más utilizado es la turbina de vapor, y sólo en aquellos casos donde por las razones que sean, no existe suficiente vapor para accionar el compresor, se utilizan motores eléctricos

A continuación en la *figura 12* y en la *figura 13* , se puede observar unos compresores centrífugos reales.



Figura 12.- Ejemplo 1 de compresores centrífugos

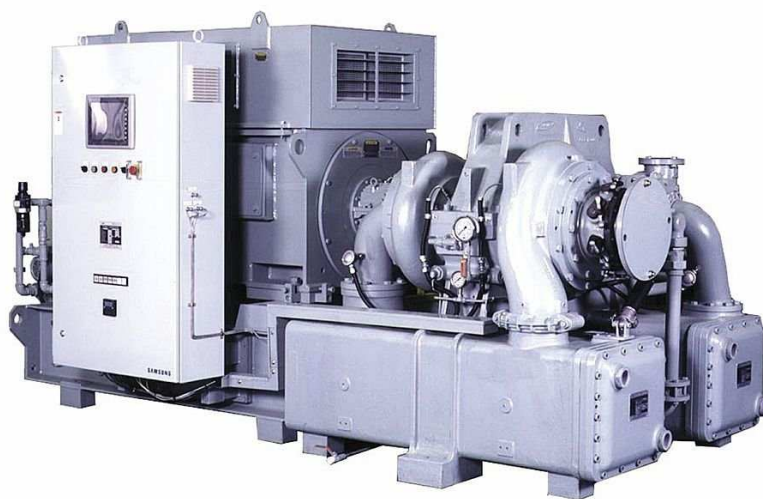


Figura 13.- Ejemplo 2 de compresores centrífugo

2.2.1.2 Compresores alternativos

El funcionamiento de los compresores alternativos se basa en el movimiento alternativo que realiza un pistón al moverse linealmente dentro de un cilindro. La acción de desplazamiento del pistón, junto con la entrada de las válvulas, como se observa en la *figura 14*, provoca que una cantidad de gas entre en el cilindro y trabaje en turnos de compresión y descarga.

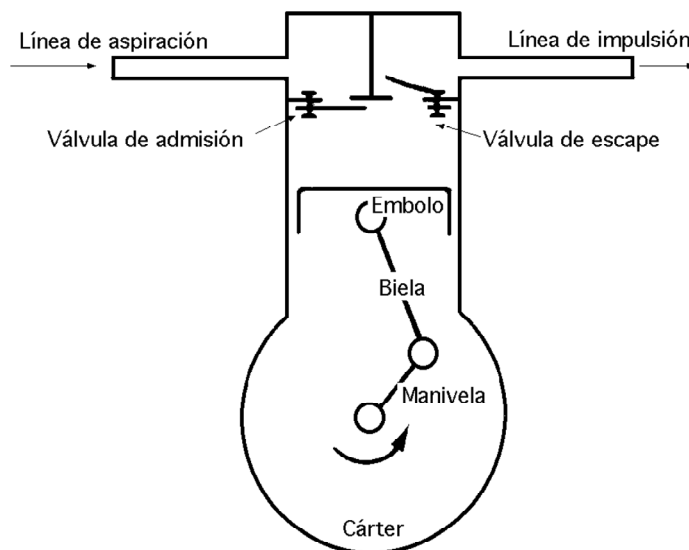


Figura 14.- Funcionamiento interno de un compresor alternativo

En la *figura 15* mostrada a continuación, pueden observar las partes internas de un compresor alternativo.

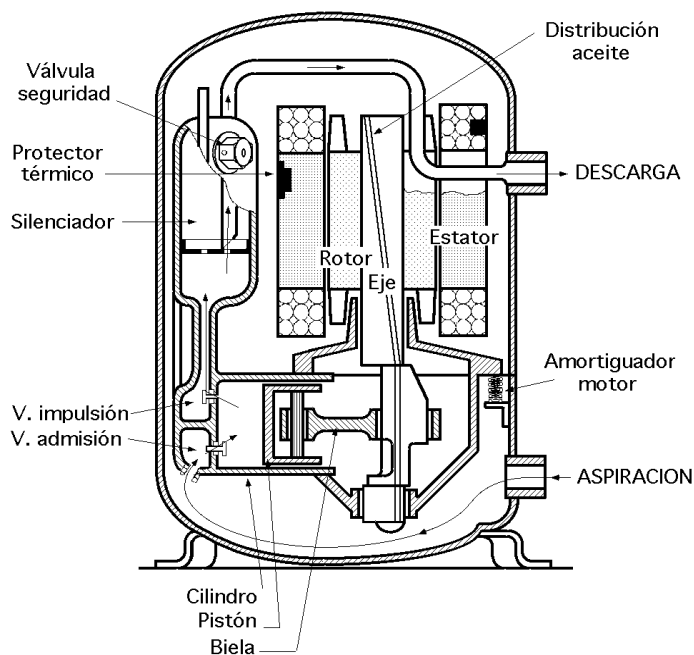


Figura 15.- Interior de un compresor alternativo

La acción de las válvulas de descarga previene el retorno del gas al interior del compresor desde la línea de descarga durante el siguiente ciclo de consumo.

El ciclo de trabajo del compresor, como se puede observar en la *figura 16*, se divide en cuatro etapas:

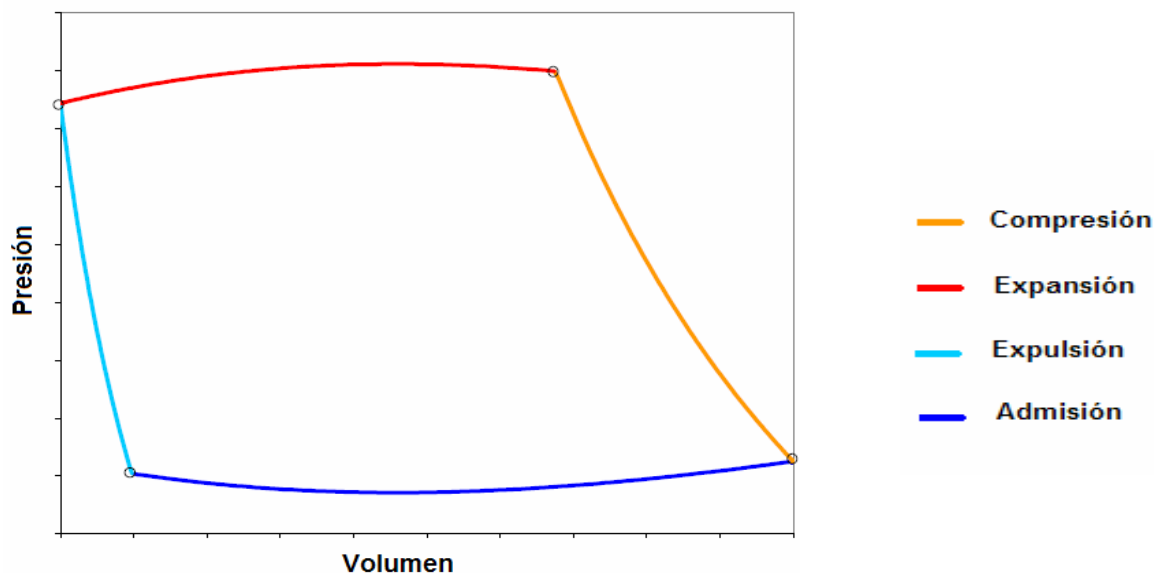


Figura 16.- Ciclo de compresión

A continuación se analizan detenidamente cada una de las etapas del ciclo de un compresor alternativo:

- Comienzo de la compresión.** El cilindro se encuentra lleno de gas.
- Etapas de compresión.** El pistón actúa sobre la masa de gas reduciendo su volumen original y aumentando la presión del mismo. Las válvulas del cilindro durante esta etapa permanecen cerradas.
- Etapas de expulsión.** Instantes anteriores a completar la carrera de compresión, la válvula de descarga se abre. El gas comprimido sale del cilindro por su propia presión, a través de la válvula de descarga. Antes de alcanzar el final de carrera, la válvula de descarga se cierra dejando el espacio libre del cilindro lleno de gas a la presión de descarga.
- Etapas de expansión.** El pistón comienza la carrera de retroceso, el gas contenido dentro del cilindro aumenta de volumen con lo que la presión interior del sistema se reduce. Durante esta etapa tanto la válvula de descarga como la de entrada permanecen cerradas justo antes de acabar la carrera de retroceso, la válvula de admisión al cilindro se abre.
- Etapas de admisión.** El pistón durante esta etapa retrocede provocando una depresión en la interior del cilindro que es compensada por la entrada de gas fresco a través de la línea de admisión. En el momento en que el pistón va a llegar al punto inferior de la carrera la válvula de admisión se cerrará, volviendo al primer estado (A), iniciando un nuevo ciclo.

A continuación, en la *figura 17*, se muestra gráficamente las 4 etapas recientemente explicadas.

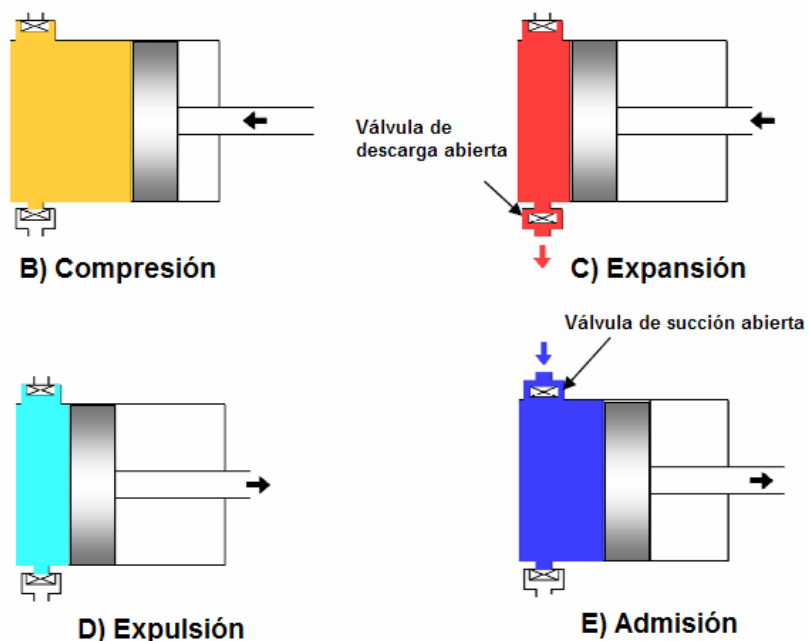


Figura 17.- Etapas del ciclo de un compresor alternativo

El compresor alternativo tiene una gran desventaja histórica en relación con el compresor centrífugo, debido a su mayor coste de mantenimiento y a su menor capacidad. Sin embargo, la reciente subida del coste de la energía y el estudio de nuevas plantas de proceso especializadas, han dado una mayor flexibilidad y eficiencia a los compresores alternativos.

Seguidamente se puede observar en la *figura 18*, un compresor alternativo real.

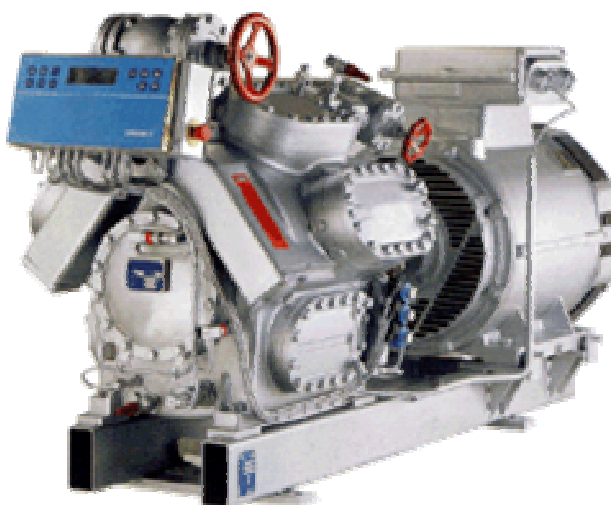


Figura 18.- Ejemplo de compresor alternativo

La mayoría de los compresores utilizados en la industria petroquímica son de estos dos tipos, centrífugos o alternativos. Por ello, en la *Tabla 1* se muestra una pequeña comparativa entre ambos tipos de compresores, que nos permite entender la elección de cada uno de ellos en función de las especificaciones que el compresor debe requerir.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Alternativo	Gran Flexibilidad en rango operacional Maneja menor caudal Menor coste por potencia Menos sensible a cambios en la composición del gas	Alto coste inicial Alto coste de mantenimiento Mayor tiempo de parada Tamaño y peso elevado Motores de baja velocidad y alto mantenimiento
Centrífugo	Menor coste inicial Menor coste mantenimiento Menor tiempo de parada Menor tamaño y masa Motores de alta velocidad y bajo mantenimiento	Rango operativo limitado Límite inferior de caudal Alto coste por potencia de motor Sensible a cambios en composición y densidad del gas

Tabla 1.- Comparativa entre compresores Alternativos y Centrífugos

2.2.1.3 Compresores de anillo líquido

Este tipo de compresores están constituidos por un rotor con alabes fijos, montados excéntricamente dentro de una cámara circular. Son compresores exentos de aceite, sin válvulas y con relación de compresión fija. El cilindro está prácticamente lleno de un líquido que durante el funcionamiento y por la acción de la fuerza centrífuga, es proyectado contra las paredes del cilindro, formándose un anillo líquido, que presenta respecto al rotor la misma excentricidad que la carcasa. La compresión del gas se logra por la reducción del volumen entre dos alabes, actuando el líquido como sello. Todo este proceso se puede observar gráficamente en la *figura 19*.

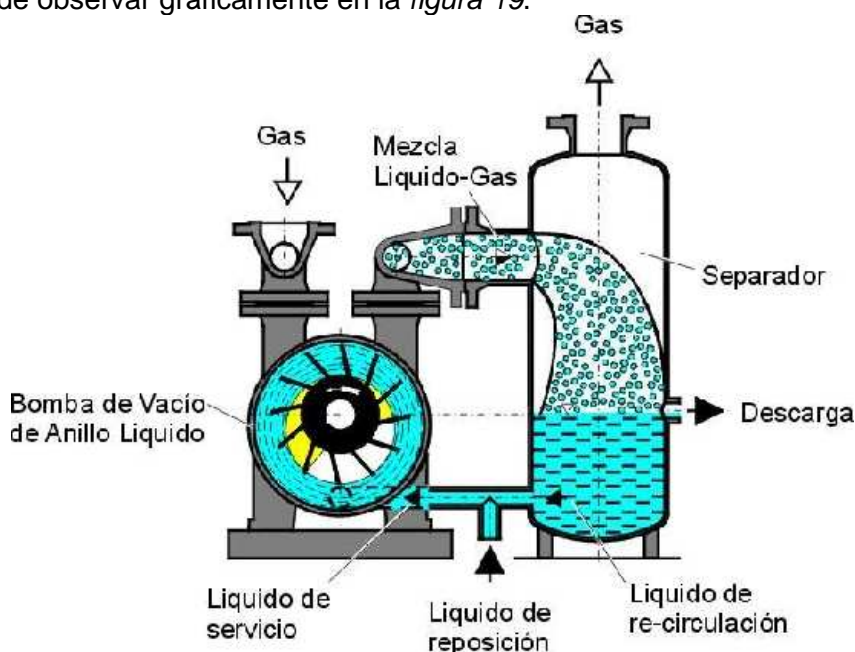


Figura 19.- Esquema de funcionamiento de compresor de anillo líquido

La refrigeración de estos compresores es directa, debido el íntimo contacto entre el gas y el líquido, pudiéndose mantener la temperatura de descarga muy próxima a la entrada del líquido. Sin embargo, el gas se encuentra saturado con el líquido del anillo, a la temperatura de descarga. Pueden comprimir casi todos los gases y vapores, aunque contengan polvo y líquido.

Habitualmente se utiliza agua para generar el anillo líquido, aunque se puede emplear otros líquidos en el caso de que se quieran obtener resultados específicos durante el proceso de compresión contra ataques corrosivos de gases y vapores activos.

El grado máximo de compresión alcanzada, depende de la energía adquirida por el líquido en movimiento y por lo tanto, de la naturaleza del mismo, como asimismo de la velocidad de rotación de los rotores.

A continuación, en la *figura 20*, se observa un compresor de anillo líquido real.



Figura 20.- Ejemplo de compresor de anillo líquido

2.2.1.4 Esquema del equipo de compresión

A continuación, en la *figura 21*, se adjunta el equipo completo de un compresor.

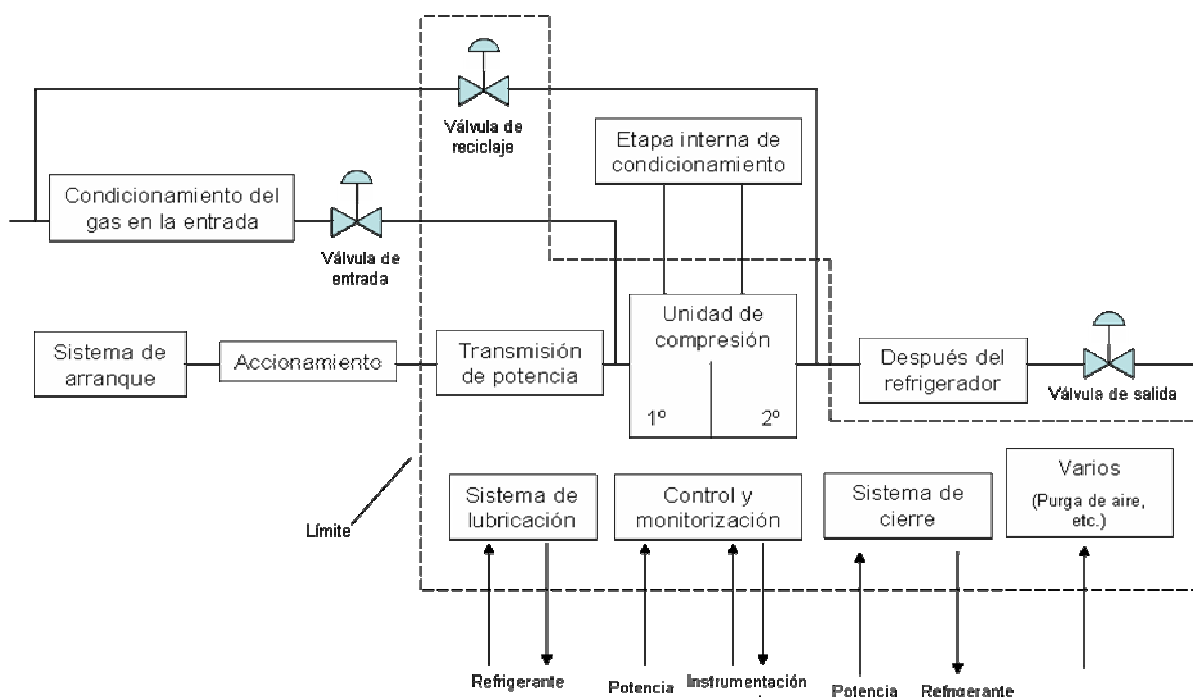


Figura 21.- Equipo de un compresor

El esquema del equipo de compresión mostrado en la *figura 21*, puede aplicarse a cualquier compresor utilizado en la industria petroquímica. Cabe destacar que en el paquete comprendido por cada compresor, no están incluidas las válvulas de entrada y salida, ni el accionamiento, tal y como se observa en la línea que acota la *figura 21*. Las unidades de accionamiento se registran en inventarios separados (motores eléctricos, turbinas de gas o motores de combustión), y por tanto, los fallos producidos en dichos accionamientos se analizan en estudios de seguridad externos a los realizados al compresor.

2.2.2 BOMBAS

La bomba es una máquina que absorbe energía mecánica que puede provenir de un motor eléctrico o térmico y la transforma en energía transferible a un fluido como energía hidráulica, la cual permite que el fluido pueda ser transportado de un lugar a otro, a un mismo nivel y/o a diferentes niveles y/o a diferentes velocidades.

2.2.2.1 Bombas centrífugas

Una bomba centrífuga es una máquina formada por un conjunto de alabes rotatorios encerrados dentro de una cubierta o carcasa. Los alabes imparten energía al fluido por la fuerza centrífuga que les proporciona el giro del impulsor.

En la *figura 22*, se puede observar internamente las partes de una bomba centrífuga.

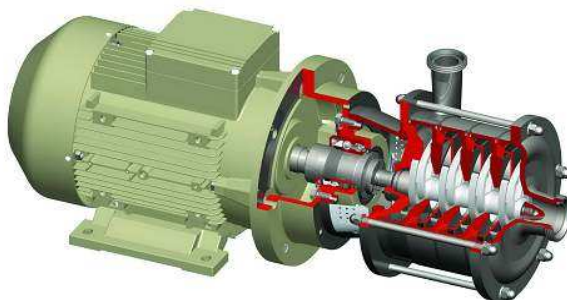


Figura 22.- Ejemplo de Bomba centrífuga

El elemento rotativo de una bomba centrífuga se denomina impulsor. La forma del impulsor puede forzar al fluido a salir en un plano perpendicular a su eje (flujo radial); puede dar al fluido una velocidad con componentes tanto axial como radial (flujo mixto) o puede inducir un flujo en espiral en cilindros coaxiales según la dirección del eje (flujo axial). Normalmente a las máquinas con flujo radial o mixto se las denominan bombas centrífugas, mientras que a las de flujo axial se las conocen como bombas de hélice.

Las bombas centrífugas son el tipo más utilizado en industria petroquímica (se utilizan en más del 90% de los casos). Sus principales características son:

- ❖ Son aparatos giratorios.

- ❖ No tienen órganos articulados y los mecanismos de acoplamiento son muy sencillos.
- ❖ La impulsión eléctrica del motor que la mueve es bastante sencilla.
- ❖ Para una operación definida, el gasto es constante y no se requiere dispositivo regulador.
- ❖ Se adaptan con facilidad a muchas circunstancias.

2.2.2.2 Bombas alternativas

Las bombas alternativas son unidades de desplazamiento positivo formadas por un pistón que oscila en un cilindro dotado de válvulas para regular el flujo de líquido hacia el cilindro y desde él durante toda la carrera.

El flujo de descarga de las bombas centrífugas y de la mayor parte de las bombas rotatorias es continuo. Pero en las bombas alternativas el flujo es intermitente y depende del tipo de bomba.

Las bombas alternativas no succionan los líquidos, sino que reducen la presión en la cámara de succión y la presión externa, generalmente la atmosférica, empuja el líquido en la bomba.

En la *figura 23* que se muestra a continuación, se puede observar una bomba alternativa real.

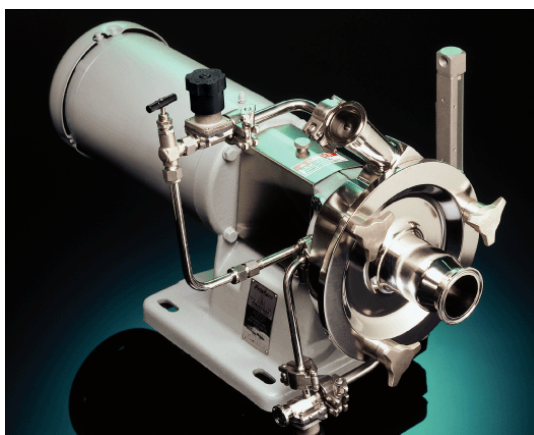


Figura 23.- Ejemplo de bomba alternativa

A continuación se muestra una pequeña comparativa entre las bombas centrífugas y alternativas, donde se observan las ventajas operativas de las primeras.

- El precio de una bomba centrífuga es aproximadamente 1/4 del precio de la bomba alternativa equivalente.
- El espacio requerido es aproximadamente 1/8 del de la bomba alternativa equivalente.
- El peso es muy pequeño y por lo tanto las cimentaciones también lo son.
- El mantenimiento de una bomba centrífuga sólo se reduce a renovar el aceite y el número de elementos a cambiar es muy pequeño

2.2.2.3 Bombas dosificadoras

Son un tipo muy concreto de bombas que sirven para dosificar de manera precisa una sustancia química a una corriente de agua, a un depósito de agua o a otro sistema donde se requiera que la concentración de una sustancia química (cloro, polímeros por ejemplo) se mantenga constante.

La exactitud de la dosificación depende principalmente, de si las bombas regulan el caudal de forma manual o digital.

A continuación en la *figura 24* y en la *Figura 25* se pueden observar dos ejemplos de bombas dosificadoras digitales.



Figura 24.- Ejemplo 1 de bombas dosificadoras digitales



Figura 25.- Ejemplo 2 de bombas dosificadoras digitales.

2.2.2.4 Esquema del equipo de una bomba

Seguidamente, en la *figura 26*, se añade el esquema de funcionamiento de una bomba motorizada en la industria petroquímica:

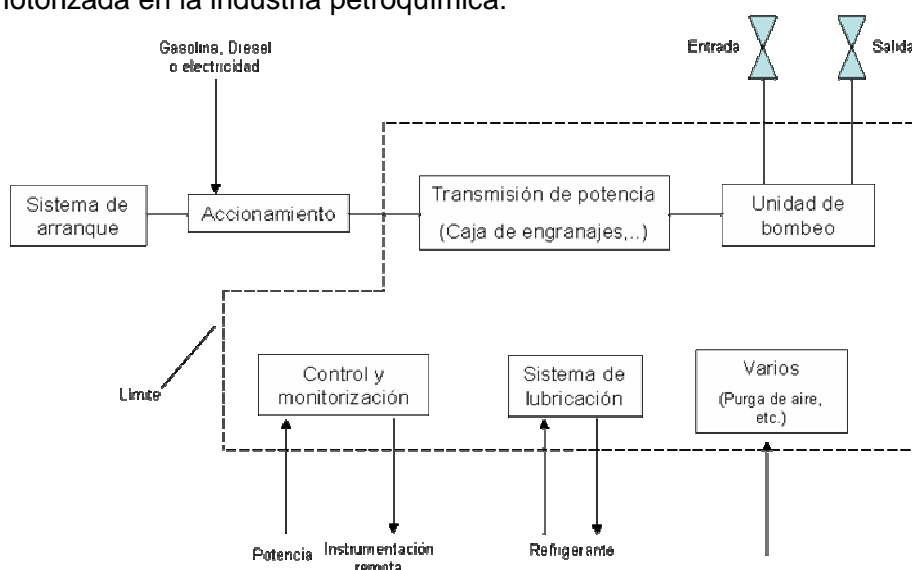


Figura 26.- Equipo de una bomba

2.2.3 TURBINAS

Una turbina es una máquina a través de la cual transita un fluido de manera continua, ya sea líquido o gas, y se extrae energía del mismo, para transformarla en potencia útil. Las partículas de flujo que salen a gran velocidad de la tobera sufren un cambio en la dirección de movimiento, generando una variación en el momento y por lo tanto una fuerza.

En la operación de las turbinas hay una cantidad de variables que necesitan ser controladas de alguna forma, las cuales dependen de las cargas de trabajo a las que sean sometidas dichas turbinas. Entre estas variables pueden estar la presión inicial del fluido, la presión de salida, la cantidad de flujo por unidad de tiempo y la velocidad de rotación.

Si el eje de la turbina está acoplado directamente, o a través de una transmisión a un mecanismo, ya sea una bomba, un ventilador, un generador; alguna variación en la carga de trabajo de alguno de estos mecanismo, presenta un cambio en el trabajo directo del eje de la turbina. Por lo tanto, ésta debe tener la habilidad de operar en condiciones de baja, media o alta carga de trabajo. Como hay una relación directa entre la potencia suministrada por la turbina y el flujo de vapor o gas que fluye a través de ella, cualquier oscilación en la carga de trabajo de la turbina, se verá reflejada en el suministro de fluido a ésta, aumentando ó disminuyendo dependiendo de las condiciones de trabajo requeridas.

2.2.3.1 Turbinas de vapor

Las turbinas de vapor se emplean principalmente en las centrales eléctricas de generación de energía eléctrica y en servicios de refinerías.

El esquema de los componentes necesarios para instalar una turbina de vapor queda reflejado en la *figura 27*.

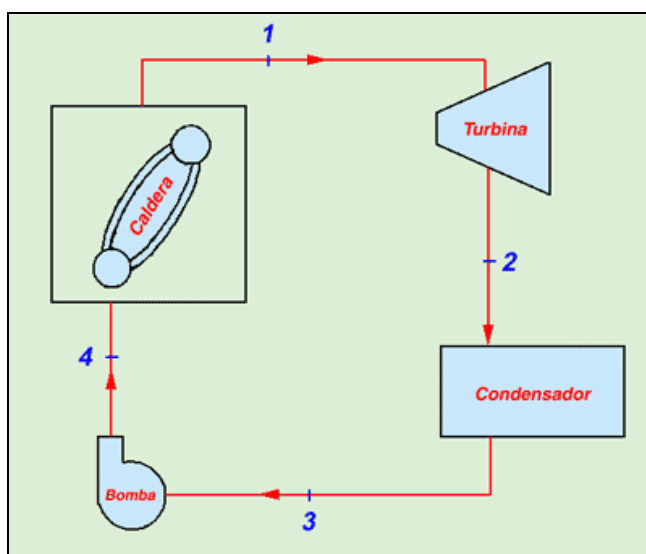


Figura 27.- Esquema de funcionamiento de una turbina de vapor

Analizando detenidamente cada uno de los componentes, tenemos:

- Caldera: su función es la de generar el vapor necesario para el funcionamiento de la turbina.
- Turbina: es la encargada de utilizar la energía del vapor de la caldera y transformarla en trabajo útil para mover un generador eléctrico.
- Condensador: se emplea para condensar el vapor que sale de la turbina.
- Bomba: usada para alimentar la caldera con el agua que proviene del condensador.

El principio de funcionamiento de las turbinas de vapor tiene su fundamento en el ciclo termodinámico conocido como Ciclo Rankine, representado en la *figura 28*.

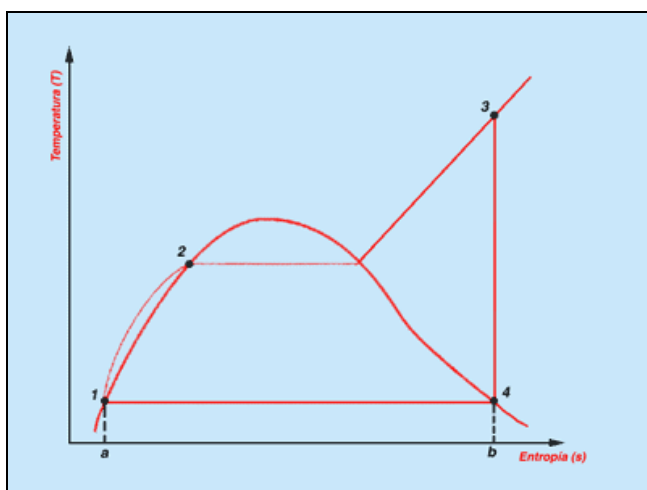


Figura 28.- Ejemplo de turbina de vapor

- 1-2** Proceso de bombeo adiabático y reversible.
- 2-3** Transferencia de calor al fluido de trabajo en una caldera a presión constante.
- 3-4** Expansión adiabática y reversible del fluido en la turbina.
- 4-5** Transferencia de calor desde el fluido de trabajo a presión constante en el condensador.

2.2.3.2 Turbinas de gas

En las turbinas de gas debemos resaltar la cámara de combustión, donde se produce la mezcla de combustible y se quema el aire a alta presión. Los gases que resultan del proceso de combustión pasan a la turbina con una temperatura uniforme.

Para que el proceso de combustión se desarrolle correcta y eficientemente en una turbina de gas, la cámara de combustión debe cumplir con las siguientes funciones:

- ❖ Proporcionar los medios necesarios para una adecuada mezcla del aire a alta presión y del combustible.
- ❖ Quemar eficientemente la mezcla de aire y combustible.
- ❖ Entregar los gases con una temperatura uniforme que no sobrepase los límites de resistencia de los materiales con los cuales están contruidos los alabes del rotor y estator.

El modelo termodinámico de las turbinas de gas se fundamenta en el ciclo de Brayton, representado en la *figura 29*.

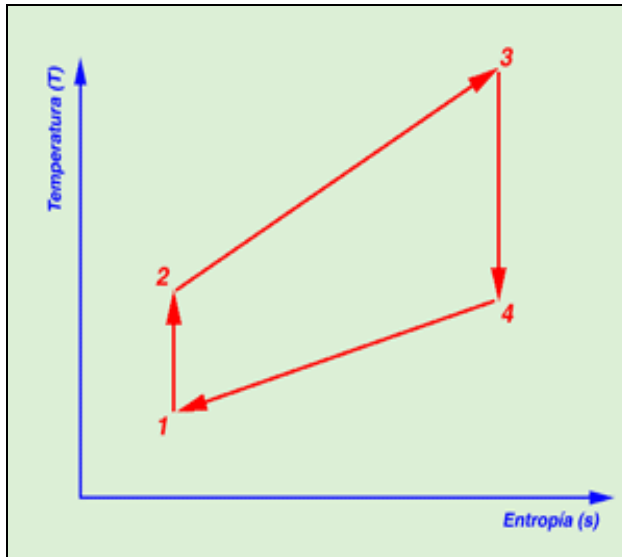


Figura 29.- Ciclo Brayton ideal

- 1-2** Compresión isentrópica en un compresor.
- 2-3** Adición de calor al fluido de trabajo a presión constante en un intercambiador de calor o una cámara de combustión.
- 3-4** Expansión isentrópica en una turbina.
- 4-5** Remoción de calor del fluido de trabajo a presión constante en un intercambiador de calor o en la atmósfera.

A continuación en la *figura 30* se pueden observar un ejemplo de turbina de gas.



Figura 30.- Ejemplo de turbina de gas

2.2.4 VENTILADORES (Y SOPLANTES)

Los ventiladores, como el mostrado en la *figura 31*, son máquinas destinadas a producir un incremento de presión total pequeño; convencionalmente se fija el límite de Δp_{total} para ventiladores en 9806,65 Pa., o una relación de compresión, $\xi = 1,1$.

En la actualidad, en el diseño se tiene en cuenta la compresibilidad para incrementos de presión mucho menores, hasta 2941 Pa., por lo que los ventiladores, hasta dicho incremento de presión, se pueden diseñar y considerar como una turbomáquina hidráulica.

Los soplantes o turbosoplantes son máquinas destinadas a comprimir gases en donde la relación de compresión está comprendida en el intervalo $(1,1 < \xi < 3)$ y no tienen refrigeración incorporada.

Una clasificación orientativa de las turbosoplantes es:

- ❖ Soplantes de BP $\xi = 1,1 - 1,5$
- ❖ Soplantes de MP $\xi = 1,5 - 2,5$
- ❖ Soplantes de AP $\xi = 2,5 - 4$

El ventilador es una bomba rotodinámica de gas que sirve para transportar gases, absorbiendo energía mecánica en el eje y devolviéndola al gas. Se distingue del turbocompresor en que las variaciones de presión en el interior del ventilador son tan pequeñas, que el gas se puede considerar prácticamente incompresible.

Los ventiladores que se emplean comúnmente se pueden dividir en tres tipos:

- ❖ Hélice
- ❖ Axiales
- ❖ Centrífugos.

Los ventiladores se pueden disponer con variedad de posiciones de descarga y con rotación del impulsor, ya sea en el sentido de las agujas del reloj o viceversa.



Figura 31.- Ejemplo de un ventilador (soplador)

2.2.5 REDUCTORES DE VELOCIDAD

En la industria mecánica, es de vital importancia poder reducir la alta velocidad de los motores para poder emplearlos como accionamiento de las máquinas a velocidades distintas según su uso. Además de reducir se deben contemplar las posiciones de los ejes de entrada y salida y la potencia mecánica a transmitir.

Para potencias bajas se utilizan moto-reductores que son equipos formados por un motor eléctrico y un conjunto reductor integrado. Las herramientas manuales, tales como taladros, lijadoras, cepillos, esmeriles; poseen un moto-reductor.

Para mayores potencias se utilizan equipos reductores separados del motor. Los reductores consisten en pares de engranajes con gran diferencia de diámetros, de esta forma el engrane de menor diámetro debe dar muchas vueltas para que el de diámetro mayor de una vuelta, de esta forma se reduce la velocidad de giro. Para obtener grandes reducciones se repite este proceso colocando varios pares de engranes conectados uno a continuación del otro.

En la *figura 32* mostrada a continuación se observan varios ejemplos.



Figura 32.- Ejemplos de reductoras de velocidad

En las dos primeras cajas, es importante notar que se abren en dos mitades y la línea de unión está en el plano que forman los ejes. Este diseño se basa en la conveniencia de abrir la caja al nivel de los ejes para extraerlos con facilidad y permitir el cambio de rodamientos, sellos de aceite, revisar el desgaste de los dientes y otros mantenimientos preventivos.

Destacar también la tercera imagen de la *figura 32*, ya que muestra una caja con engranes tipo tornillo sinfin y rueda helicoidal. Este mecanismo es muy conveniente como reductor de velocidad en un sólo paso. El tornillo o gusano se ubica en la parte inferior de la caja para asegurar una lubricación abundante.

2.2.6 AGITADORES

El mezclado es el proceso según el cual varios componentes se ponen en contacto, de tal forma que al final de la operación se obtiene un sistema homogéneo a cierta escala (desde molecular hasta macroscópica). Según la escala de mezclado y la miscibilidad relativa de las sustancias en presencia, el resultado puede ser una solución, una coloide o una dispersión micro o macroscópica.

El mezclado se obtiene mediante un proceso de agitación, que se lleva a cabo generalmente en un tanque bien de forma continua o mezclador estático. Según se trate de mezclar o dispersar dos fluidos miscibles o inmiscibles, un sólido en un líquido, un gas en un líquido, o dos sólidos granulados, el problema tecnológico puede ser muy diferente.

Se utiliza en varios procesos:

- ❖ Homogenización
- ❖ Puesta en suspensión
- ❖ Preparación de reactivos
- ❖ Toda mezcla:
 - Líquido / Líquido
 - Líquido / Sólido
 - Líquido / Gas

Un ejemplo de agitador se puede observar en la figura 33.



Figura 33.- Ejemplo agitador

3 LA SEGURIDAD INDUSTRIAL EN UNA REFINERÍA

3.1 CAPAS DE PROTECCIÓN

Todo proceso industrial que maneje sustancias peligrosas tiene un riesgo inherente que debe reducirse hasta niveles considerados aceptables. Las instalaciones industriales cuentan con un esquema de capas de protección.

Existen dos grandes grupos de capas de protección:

- **Prevención:** Diseñadas para evitar la aparición de incidentes peligrosos. Las podemos clasificar en:
 - Diseño inherente seguro.
 - El control básico de proceso.
 - El sistema de alarmas.
 - Los sistemas instrumentados de seguridad (SIS).
- **Mitigación:** Diseñadas para mitigar en la medida de lo posible, las consecuencias de un evento peligroso que ya ha ocurrido. Estas son:
 - Los dispositivos mecánicos (válvulas de seguridad, discos de ruptura, etc.)
 - Los dispositivos de contención (diques, muros de hormigón, etc.).
 - Los sistemas de detección de Fuego y Gas.
 - Los sistemas de extinción de incendios.
 - El Plan de emergencia del Complejo Industrial.
 - El Plan de emergencia de la Comunidad.

Las capas de protección en una refinería tienen un esquema parecido a una cebolla, como el mostrado en la *Figura 34*. Unas capas actuarán previniendo la materialización del peligro y otras actuarán para mitigar o reducir las consecuencias de un accidente.



Figura 34.- Capas de protección de una instalación



A continuación se analizarán de forma detallada cada una de estas capas de protección.

➤ **Diseño inherente al proceso**

Un diseño inherentemente seguro es aquel que evite riesgos en lugar de controlarlos, reduciendo por ejemplo la cantidad de material peligroso y el número de operaciones peligrosas en la planta.

➤ **Control de proceso**

Las refinerías cuentan con un Sistema de Control cuya misión es realizar el control continuo del proceso, manteniendo sus condiciones en los límites de operación considerados normales.

Aunque la función primaria de estos controladores sea la de monitorizar y controlar el proceso en continuo manteniéndolo en las condiciones preestablecidas, también puede realizar funciones de protección como:

- Realizar acciones que devuelvan al proceso al rango normal de las variables de operación. En numerosas circunstancias se producen variaciones admisibles en el proceso, y en este caso no es necesario, por razones de seguridad, parar el proceso.
- Realizar acciones que paren el proceso llevando el sistema a un estado seguro.

Dado que las funciones de los controladores trabajan en continuo (alta demanda), están sujetas a chequeos continuos por parte del personal responsable, por lo que los posibles fallos se detectan de forma inmediata.

➤ **Alarmas**

La siguiente capa de protección por orden de actuación son las alarmas. Esta capa de protección es distinta al resto, ya que la alarma, según su tarado preestablecido, únicamente indica que se ha producido una variación del proceso anormal, e insta al operario a tomar las medidas pertinentes para solventar esta desviación de la normalidad del proceso.

La intervención humana tiene ciertas limitaciones debido a que existe el potencial error del operario o del procedimiento seguido por este.

También resulta importante priorizar las alarmas procedentes de los controladores por nivel de importancia, ya que si el operario de panel recibe una batería de alarmas simultaneas, no será capaz de procesar toda la información. Por lo que las alarmas que requieran intervención humana deberán priorizarse y distinguirse claramente de las que no requieran de una acción inmediata. Asimismo se debe definir el tiempo de seguridad del proceso, como el tiempo correspondiente entre la demanda o variación del proceso a una zona operativa considerada como inaceptable, hasta que el proceso entra en una situación peligrosa.

➤ **Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)**

Es un sistema compuesto de sensores, procesadores de lógica y elementos finales, encargados de llevar automáticamente un proceso industrial a su estado seguro o tomar acción para mitigar las consecuencias de un peligro industrial cuando las variables del proceso superan determinados valores límites dado que el sistema de control del proceso no ha conseguido mantener el proceso en las condiciones requeridas.

➤ **Dispositivos mecánicos**

Los dispositivos mecánicos para la mitigación de peligros son los siguientes:

- *PSV y Discos de ruptura*: Ambos dispositivos se instalan en líneas o depósitos. Se encargan de ventear a la atmósfera si se supera una presión tarada previamente en los mismos.
- *Válvulas Antirretorno*: Válvulas que permiten el libre tránsito de producto única y exclusivamente en el sentido correcto del proceso.
- *Puertas de explosión*: Ayudan a reducir la sobrepresión en caso de una explosión, y por tanto a minimizar el colapso de estructuras y equipos.
- *Válvulas de exceso de flujo*: Válvulas que se colocan generalmente en las líneas en la descarga de esferas y depósitos, que bloquean dicha línea por exceso de caudal debido a fugas aguas abajo.

➤ **Dispositivos de contención (Protección pasiva)**

Se tratan de barreras físicas cuya finalidad es mitigar las posibles consecuencias. Algunos ejemplos serían: cubetos, muros contra explosión, búnkeres.

➤ **Sistemas de detección de Humos y Gases.**

Para poder detectar fugas de gases y fuegos en una planta dentro de una refinería se utilizan sistemas de detección de gases y de humos que alarman al operador cuando se produce un fallo que los genere.

Los sistemas automáticos para la detección empleados en las plantas petroquímicas son:

- *Detectores de gases combustibles*: Utilizan celdas catalíticas o sensores por puente de Wheatstone (circuito eléctrico balanceado) para indicar la presencia de gases que, en presencia de oxígeno conforman una atmósfera potencialmente peligrosa.
- *Detectores de gases tóxicos*: Consta de un sensor electroquímico capaz de detectar un gas previamente programado.
- *Detectores térmicos*: Sensibles a las temperaturas anormalmente altas o a sus rápidos incrementos.
- *Detectores de humos*: Sensibles a las partículas visibles o invisibles de los productos de combustión.



- *Detectores de llamas*: Sensibles a las radiaciones infrarrojas, ultravioletas o visibles producidas por el fuego.

➤ **Sistemas de protección contra incendios**

Protección activa

La protección activa hace referencia a los sistemas que se ponen en funcionamiento una vez se ha detectado un incendio, o un principio del mismo, para evitar daños mayores y preservar la seguridad de las personas y bienes materiales que se encuentren en el lugar. Entre estos medios activos se encuentran los: monitores, hidrantes, sistemas fijos de rociadores o sprinklers, etc.

Protección Pasiva

La protección pasiva contra incendios comprende todas aquellas medidas dirigidas a limitar la propagación del fuego y retardar sus efectos. La utilización de materiales ignífugos para la protección de estructuras y equipos permitiría evitar, en la medida de lo posible, una propagación del fuego en caso de incendio.

➤ **El Plan de emergencia del Complejo Industrial.**

La respuesta de emergencia depende de los equipos de comunicación y de los sistemas de alarma para avisar a los operarios de una situación peligrosa pudiendo desembocar esta en una posible evacuación rápida y de la necesidad de equipos de protección personal. Los sistemas de alarma y equipos de comunicación deben ser independientes de sistemas que puedan verse afectados por el incidente de proceso.

➤ **El Plan de emergencia de la Comunidad.**

Este plan engloba a toda la comunidad donde esté situada la refinería, quedando reflejadas todas las medidas necesarias de evacuación y mitigación de los posibles problemas que se puedan ocasionar en la refinería a este nivel.

3.2 GESTIÓN DEL RIESGO

En cualquier instalación industrial que maneje sustancias peligrosas, es necesario llevar a cabo una exhaustiva gestión del riesgo consistente en la identificación sistemática de los posibles peligros, la evaluación de los riesgos y la comparación con criterios de referencia o aceptabilidad. En caso de que los riesgos identificados sean considerados superiores a los aceptables, se tomarán medidas de reducción de riesgo que van desde introducir salvaguardas técnicas y administrativas o incluso detener las actividades hasta corregir la situación peligrosa.

A continuación se describirán las técnicas utilizadas para la identificación de los posibles peligros y las utilizadas para el cálculo del riesgo.

3.2.1 IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

El *peligro* es una condición física o química que tiene el potencial de causar daños a las personas, propiedades o ambiente. La gestión del riesgo industrial requiere una sistemática búsqueda de los posibles peligros desde los más evidentes hasta aquellos que no son fácilmente identificables.

Existen numerosas técnicas para la identificación de peligros en la industria y de ellas las que se consideran más adecuadas para los procesos industriales en los que intervienen equipos dinámicos. Las principales son el Análisis de Fallos y Accidentes, los PHA (Process Hazard Analysis) y el aprovechamiento de la experiencia operativa.

3.2.1.1 Técnicas de identificación de peligros

ANÁLISIS DE FALLOS Y ACCIDENTES EN EQUIPOS DINÁMICOS

Podemos definir el fallo como el fin o la degradación de una habilidad necesaria para que la máquina o equipo cumpla con sus funciones. Esto incluye:

- Fallo completo del equipo.
- Fallo de una parte del equipo que provoca la inhabilitación de la máquina por una acción correctiva.
- Detección de un fallo durante una inspección o mantenimiento preventivo que requiere su posterior reparación.
- Fallo en la seguridad del mecanismo o control que necesita ser cerrado o reducir su capacidad por debajo de unos límites específicos.

Debemos clasificar los fallos en dos grandes grupos:

- Fallos externos a la máquina o fallos originados en el proceso.
- Fallos internos a la máquina.

Los fallos externos, son lo que se producen en las máquinas por variaciones del régimen de trabajo motivadas por desviaciones excesivas de los parámetros del proceso en los que están trabajando y que se podrían considerar como externos a la máquina, este es el objetivo principal del presente trabajo. Más adelante, en el *capítulo 4* se analizarán las variaciones de los parámetros de proceso que pueden generar



consecuencias indeseadas dando lugar a fallos mecánicos y daños a las personas, instalaciones y medio ambiente. También se identificarán las salvaguardas necesarias para reducir los riesgos a niveles aceptables.

Por otro lado, existen fallos propios de la máquina y que no están motivados por las condiciones del proceso que denominaremos fallos internos a la máquina. Este campo ha sido ampliamente estudiado y analizado por los fabricantes de los equipos. Existen en la actualidad numerosos documentos que estudian los modos de fallo así como la probabilidad de fallo de todo tipo de equipos mecánicos. Se adjunta en el Anexo II un estudio de probabilidad de fallo interno en compresores centrífugos y alternativos.

PHA (ANÁLISIS DE PELIGROS DE PROCESO)

El término PHA se corresponde con las siglas en inglés de Process Hazard Analysis (Análisis de los Peligros de Proceso). Engloba una serie de técnicas que permiten la adecuada detección de peligros, así como la posterior valoración cualitativa y/o cuantitativa de los riesgos presentes en cualquier proceso, a fin de minimizarlos o, en su defecto, controlarlos.

Dentro de las técnicas mas utilizadas para la conducción de estudios PHA se podemos destacar:

- **FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)**

Es una técnica formal usada para identificar posibles fallos en un proceso, evaluar la magnitud de las consecuencias e identificar recomendaciones para reducir la severidad de las mismas.

El uso temprano y constante de FMEA en el proceso del diseño permite que el ingeniero diseñe fuera de faltas y produzca productos confiables, seguros, para el cliente. FMEA también captura la información histórica para el uso en la mejora futura del producto.

El FMEA es un documento vivo. A través de ciclo de desarrollo del producto, cambio y realización de actualizaciones sobre el producto y el proceso. Estos cambios pueden e introducen a menudo nuevos modos de fallo, que se deben seguir analizando.

- **HAZOP (HAZard and OPerability analysis)**

El estudio HAZOP es una técnica estructurada y sistematizada de análisis de riesgos que permite identificar peligros potenciales y problemas operacionales en procesos químicos, generalmente documentados a través de diagramas de procesos e instrumentos (P&IDS. *Acrónimo de la expresión inglesa "Pipe & Instrumentation Diagram". Con esta expresión se designan a los planos que representan, sin escala, el proceso químico y sus elementos de control automático).*

Realización del estudio

El estudio de seguridad HAZOP se realiza bajo una dinámica de grupo, es decir, representantes de cada área, tales como procesos, máquinas, seguridad, y suministradores de los diversos componentes, se reúnen y desarrollan este



documento en base a la experiencia y a los estudios realizados a los componentes con anterioridad.

Los motivos por los que es necesario realizar un HAZOP son entre otros los siguientes:

- ❖ Como buena práctica de ingeniería
- ❖ En cumplimiento de requisitos legales
- ❖ Como resultado de recomendaciones explícitas procedentes de:
 - Investigación de un accidente
 - Acciones de mejora del Sistema de Gestión de la Seguridad Industrial.
 - Iniciativas concretas del servicio de prevención y salud laboral.

Todos los proyectos de inversión de plantas de proceso, transporte, carga, descarga o almacenamiento que manejen sustancias peligrosas deberían disponer de un estudio HAZOP y revisar regularmente dicho informe para asegurarse que esté actualizado.

Aplicación de la Técnica HAZOP

El método HAZOP se centra en el análisis de las desviaciones de las variables o parámetros característicos de la operación de una instalación respecto de la intención del proceso. La técnica HAZOP utiliza palabras clave (NO, MAS, MENOS, etc.) que aplicadas a los parámetros de proceso (CAUDAL, PRESIÓN, TEMPERATURA, etc.) dan lugar a desviaciones (MAS CAUDAL, MENOS PRESIÓN, etc.) de la intención o condición normal de proceso. Una vez determinadas las desviaciones de las variables de proceso, se determina la lista de posibles causas que las provocan, el escenario (opcional) que se puede derivar y sus consecuencias.

Para cada causa-consecuencia se tendrán que identificar las salvaguardas que pueden prevenir, detectar, controlar y/o mitigar la situación identificada. La correcta selección de las salvaguardas (o capas de protección) es un aspecto muy importante en esta metodología. Si las salvaguardas existentes no son suficientes para minimizar el riesgo que genera la situación planteada, el grupo de trabajo encargado de realizar el HAZOP, propondrá unas acciones encaminadas a reducirlo (tanto en frecuencias como consecuencias).

En determinadas circunstancias las causas de fallo enumeradas en un HAZOP no son independientes, debido a que la ocurrencia de una de ellas determina de modo drástico la probabilidad de ocurrencia de otras causas de fallo. Por ello la dependencia o independencia de las causas debe ser también analizada.

A continuación, se observa en la *Figura 35*, el diagrama de flujo que sintetiza las etapas a seguir para la correcta realización de un estudio HAZOP. Seguidamente se analizará detalladamente cada una de las etapas mostradas en la diagrama.

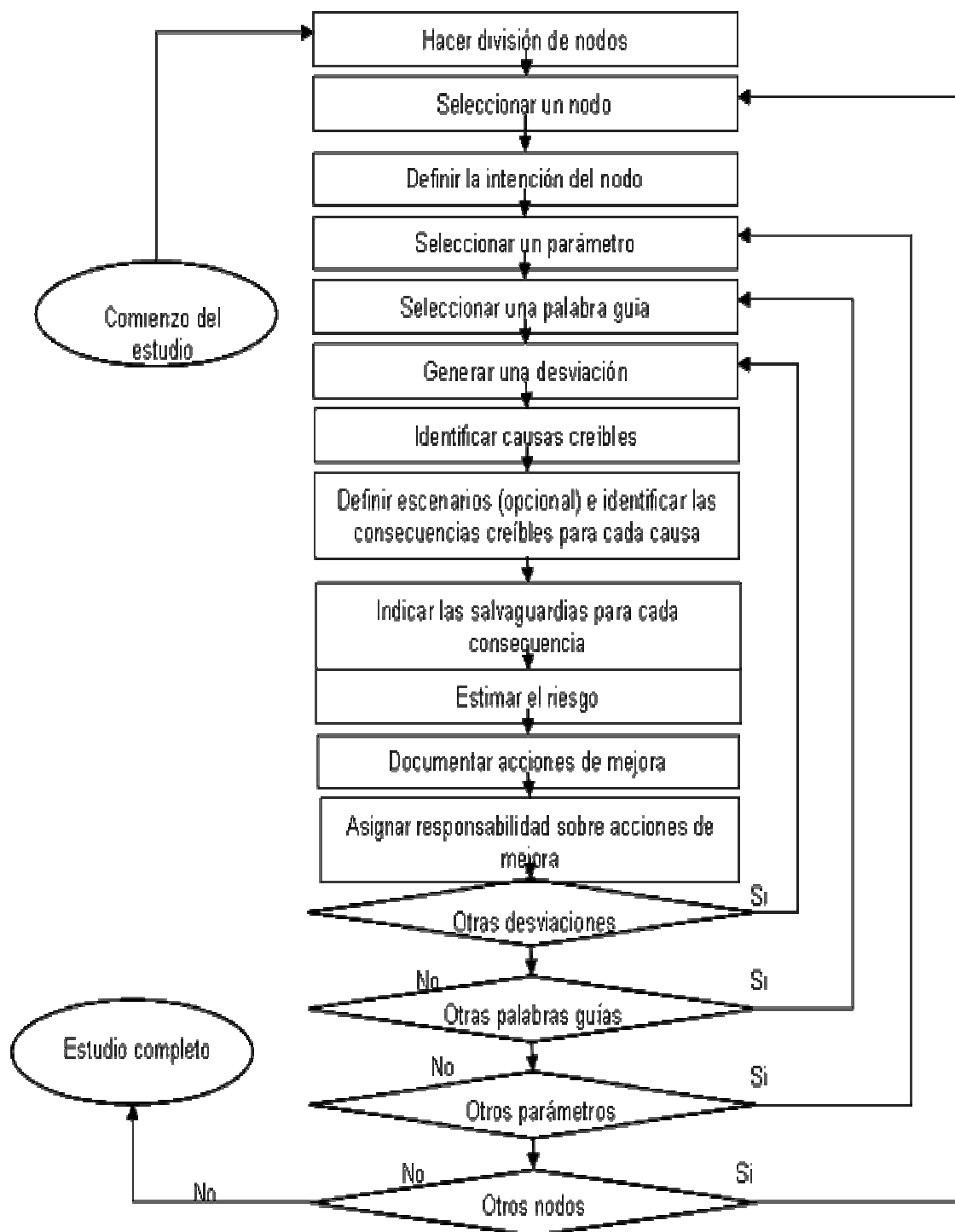


Figura 35.- Diagrama de flujo de un HAZOP

DEFINICIÓN DE NODOS

El proceso se divide en partes mas pequeñas (o subsistemas) denominados “Nodos”. El facilitador o líder de equipo del estudio HAZOP, a partir de su experiencia, y teniendo en cuenta los aspectos y criterios de la empresa, debe hacer una propuesta de división del proceso en distintos nodos y elaborar una lista ordenada de los mismos

DEFINICIÓN DE LA INTENCIÓN DEL NODO

En este apartado se describe la operación segura que se espera del nodo, indicando los rangos operativos normales de los parámetros más significativos (caudal, presión y temperatura, etc.).

SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PROCESO

El facilitador realizará una propuesta de los parámetros a considerar en cada nodo del estudio, y el grupo decidirá cuales se consideran aplicables finalmente. Los parámetros se tratan de variables que se pueden medir o detectar y que describen ciertos aspectos físicos del proceso. En caso de desviación respecto a las condiciones fijadas en el descriptivo de intención, pueden llevar al proceso a una condición peligrosa en ausencia de salvaguardas.

SELECCIÓN DE PALABRAS GUÍA

El análisis queda representado casi exclusivamente por un reducido conjunto de palabras guía estandarizada (SI/NO/MÁS/MENOS/OTRO/INVERSO/..)

PLANTEAMIENTO DE LAS DESVIACIONES

El líder de grupo debe generar las desviaciones combinando las palabras guía con los parámetros de proceso:

$$\text{Palabra guía} + \text{Parámetro} = \text{Desviación}$$

No todas las combinaciones de parámetros/palabras guía son compatibles *Figura 36*, especifica las palabras guía que pueden llegar a ser aplicadas a los principales parámetros obligatorios que hay que analizar en la realización en este tipo de estudio de análisis de peligro.

	NO/SIN (NO)	MÁS (MORE)	MENOS (LESS)	ADEMÁS / QUÉ MÁS EN (AS WELL AS)	PARTE / PARCIAL (PART OF)	INVERSO (REVERSE)	OTRO (OTHER THAN)
NIVEL		■	■				
FLUJO	■	■	■	□		■	
PRESIÓN		■	■				
TEMPERATURA		■	■				
COMPOSICIÓN				□	□		■
FASE				□	□		■
SERVICIOS	■			□	□		
OPERACIÓN				■	□		□
CONTENCIÓN	■						
IMPLANTACIÓN				■	□		
SUCESO EXTERNO				■			
FACTOR HUMANO				■			

■ Desviaciones de aplicación obligatoria

□ Desviaciones de aplicación opcional

Figura 36.- Posibles parámetros desviatorios



PLANTEAMIENTO DE CAUSAS

La determinación de las causas de las desviaciones de los parámetros del proceso es la parte más determinante del estudio HAZOP, ya que es sobre lo que se debe actuar en primer lugar.

La identificación de causas se realizará en bloque para cada desviación propuesta. Las causas deben estar definidas con el suficiente nivel de detalle en su formulación para identificar adecuadamente las consecuencias. Para ello las causas deben dar información sobre el modo de fallo considerado en los equipos o instrumentos, indicando claramente en que posición opera el elemento causante de la desviación (válvula abierta o cerrada, bomba en marcha o paro, error de operador que deja una válvula cerrada o abierta, ...)

ESCENARIOS Y CONSECUENCIAS

Un escenario es una situación identificada en un proceso que puede ocasionar daño en caso de que se desarrolle completamente y sin control. Un escenario puede expresarse como una situación de accidente con consecuencias evidentes.

Una vez establecidos cada uno de los escenarios es necesario identificar cada una de las consecuencias a partir de la siguiente clasificación:

- Efectos sobre la salud de los trabajadores.
- Efectos sobre la salud del público situado en el exterior del emplazamiento.
- Impacto medioambiental.
- Daño a la propiedad incluyendo pérdida de imagen de la compañía.

ANÁLISIS DE LAS SALVAGUARDAS

Para cada uno de los escenarios (causas/consecuencias) detectados será necesario identificar de forma exhaustiva todas las salvaguardas existentes en la instalación e identificar en la medida de lo posible sobre qué actúan: causas, eventos habilitadores, mitigación de consecuencias.

A continuación, en la *Tabla 2*, se muestra la ficha típica donde se desarrolla el estudio HAZOP de proceso.



Modelo para HAZOP de proceso

ESTUDIO DE PELIGROS Y OPERABILIDAD (Hazard and Operability study - HAZOP)												
Proyecto: ...						P&IDs: ...						
Nodo: (n) ...						Revisión: ...						
Intención del nodo: ...						Fecha: ...						
Parámetro: (*) ...						Intención del parámetro: ...						
Palabra guía	Desviación	Causas	Escenario	Consecuencias	Salvaguardas	C	P	E	R	Acciones	Por	Ref.

(*) Opcionalmente el "Parámetro" se puede manejar como una columna adicional delante de la columna "Palabra Guía".

Tabla 2.- Tabla tipo de HAZOP

EXPERIENCIA OPERATIVA

La experiencia operativa se basa principalmente en la habilidad de los operarios de la planta de prever y solucionar una posible situación peligrosa, en base a los conocimientos adquiridos en sus años de trabajo en la planta o unidad concreta dentro de la refinería y las consecuencias producidas en anteriores ocasiones por los fallos producidos; para ser capaz de actuar de una manera eficiente ante cualquier situación.

3.2.2 VALORACIÓN DEL RIESGO

El riesgo es una medida de la probabilidad de ocurrencia y de las consecuencias de un efecto indeseable. Las organizaciones tienen la obligación legal, moral y financiera de limitar el riesgo que implica sus operaciones.

Si bien el método HAZOP concentra los esfuerzos en la identificación de peligros, surge necesidad de valorar hasta que punto estos peligros pueden manifestarse de manera más o menos probable así como la magnitud de los daños o consecuencias que las mismas puedan producir. A esta acción se le denomina: "Evaluación del Riesgo" asociado al peligro identificado.

Los principales receptores del riesgo en una refinería son:

- Personal
- Medio Ambiente
- Equipos (Daño a la propiedad)
- Interrupción del negocio
- Responsabilidad del negocio
- Imagen de la empresa
- Pérdida de mercado

Una vez identificado los peligros, las posibles consecuencias de su materialización y las salvaguardas que previenen o mitigan dichas consecuencias, es necesario calcular los riesgos y compararlos con un criterio de referencia.

A continuación se desarrollan las técnicas de análisis de riesgos empleadas en una refinería.

3.2.2.1 Técnicas de Análisis de Riesgo.

MATRICES DE RIESGO

La matriz de riesgo es una técnica utilizada en análisis de riesgo industrial. En el caso concreto de una refinería se analiza el nivel de las consecuencias de cada posible escenario peligroso, así como su probabilidad de ocurrencia. El método de valoración del riesgo de puede observar en *Figura 37*.

Consecuencias ↓					
CATASTRÓFICO					Riesgo alto
SEVERO					
SIGNIFICANTE			Riesgo	medio	
MENOR					
LEVE	Riesgo bajo				
Consecuencias →	MUY IMPROBABLE	IMPROBABLE	POSIBLE	PROBABLE	FRECUENTE

Figura 37.- Matriz de riesgo

En función de la valoración que la empresa haga de las consecuencias, desde catastrófica como sería un fallo con un número elevado de muertes o unas pérdidas muy cuantiosas en producción y activos, hasta leve como sería por ejemplo un fallo concreto de una válvula de corte o de un controlador. Así como de la probabilidad de ocurrencia de las mismas, desde muy improbable que no se espera que suceda en toda la vida de la planta hasta frecuente, se podrá catalogar el escenario dentro de una rango de aceptabilidad definido por:

- Alto riesgo
- Riesgo medio
- Bajo riesgo

En función del nivel de riesgo obtenido, se determinarán unas medidas y se introducirán las salvaguardas concretas a cada escenario para tratar de evitar que se produzca, así como mitigar las posibles consecuencias que esta puede ocasionar a las personas, equipos y medio ambiente.

DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE INTEGRIDAD DE LA SEGURIDAD (SIL) MEDIANTE EL USO DE MATRICES CALIBRADAS

Los estudios de determinación del SIL de las funciones Instrumentadas de Seguridad son otro estudio de evaluación del riesgo que tiene como objetivo calcular el riesgo existente en el proceso y requerir a un Sistema Instrumentado una reducción de riesgo determinada.

A continuación se observa en la *Figura 38* una gráfica donde se observan los niveles de riesgo

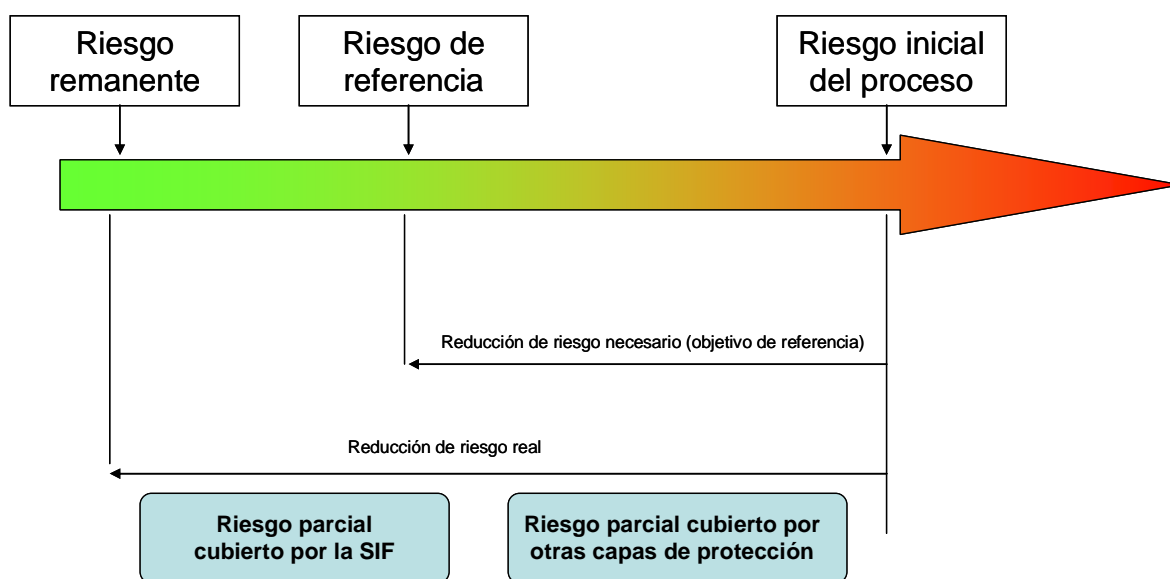


Figura 38.- Niveles de riesgo

El riesgo inicial asociado a la operación de una planta de proceso o de un equipo se puede reducir mediante varias medidas de reducción de riesgo entre los cuales están los controladores y acciones de los operarios por la actuación de una alarma hasta las funciones instrumentadas de seguridad. La *Figura 38* muestra que la suma de la contribución de todas ellas debe llevar el riesgo remanente o a un nivel inferior al riesgo de referencia.

Definiciones.

Antes de explicar la metodología SIL, se deben introducir varios conceptos:

- Un *Sistema Instrumentado de Seguridad (SIS)*

Se define como un sistema compuesto de sensores, procesadores de lógica y elementos finales con el propósito de:

1. Llevar automáticamente un proceso industrial a su estado seguro cuando ciertas condiciones específicas han sido violadas
2. Permitir que el proceso avance al próximo estado cuando las condiciones específicas se han cumplido (funciones permisivas)

3. Tomar acción para mitigar las consecuencias de un peligro industrial.

- *Función Instrumentada de seguridad (SIF)*

Una SIF es una función instrumentada de seguridad determinada encargada de realizar automáticamente un conjunto de acciones concretas mediante un SIS para llevar a estado seguro el proceso ante una desviación de su condición normal de funcionamiento.

- *Probabilidad de fallo en demanda de un SIS*

Este concepto determina la credibilidad de que se produzca un fallo de una Función Instrumentada cuando se requiere de su acción para solventar una desviación del funcionamiento normal del proceso. En *Tabla 3*, queda representada la probabilidad de fallo, así como su asignación realizada por parte de la empresa, de los principales escenarios.

- *Nivel de Integridad de Seguridad (SIL)*

Es un nivel discreto de la integridad de un sistema instrumentado de seguridad. De forma simplificada se podría decir que es una medida discreta del inverso de la probabilidad de fallo en demanda de un SIS.

En concepto SIL asociado a un sistema instrumentado, estipula una probabilidad de fallo en la misma. A continuación en la *Tabla 3* se muestra dicha relación.

NIVEL (SIL)	Probabilidad de Fallo en Demanda	Disponibilidad para cumplir con la función de seguridad
SIL 4	0,0001-0,00001	>99,99%
SIL 3	0,001-0,0001	99,9%-99,99%
SIL 2	0,01-0,001	99%-99,9%
SIL 1	0,1-0,01	90%-99%

Tabla 3.- Probabilidad de fallo de cada SIL

Un SIS con un nivel SIL 1 significa que cuando es requerido para realizar la función de seguridad para la que está diseñado tiene una probabilidad de fallo en un rango de entre 1 de cada 10 y una de cada 100 veces.

Como el riesgo es producto de la probabilidad por las consecuencias, cuando en un proceso introducimos un SIS con un nivel SIL 1 estamos reduciendo la probabilidad de ocurrencia de un escenario accidental y por tanto el riesgo en al menos 1 orden de magnitud.

Cuanto mas alto sea el nivel de SIL, irá disminuyendo la probabilidad de fallo en demanda. Para un SIL 2 la probabilidad de fallo se encuentra en un rango de entre 1 de cada 100 y una de cada 1000 veces. El SIL 3 entre 1 de cada 1000 y 1 de cada 10000 y el SIL 4 entre 1 de cada 10000 y 1 de cada 100000. Se observa que según se va aumentando el nivel SIL en una unidad, la probabilidad de fallo en demanda aumenta en un orden de magnitud.

- *Safety Gap (SG)*

Es la diferencia del riesgo del proceso sin considerar capas de protección y el riesgo de referencia (riesgo aceptable)

Metodología

La metodología para la obtención del nivel SIL, consiste en evaluar cualitativamente el impacto potencial de cada escenario accidental, considerando 3 tipos de impactos o consecuencias:

- Impactos sobre la salud y la seguridad de las personas.
- Impacto sobre el medioambiente.
- Impacto sobre las instalaciones y la producción.

Evaluando cualitativamente el impacto potencial de cada escenario accidental mediante las 3 gráficas de riesgo (*Figura 39, Figura 40, Figura 41*), se obtiene un parámetro independiente de riesgo, a personas, medio ambiente e instalaciones y producción denominado SG; que representa como se ha analizado anteriormente, la diferencia entre la seguridad requerida y la real.

Para cada escenario, se deben identificar y describir en detalle las causas y las consecuencias. Los parámetros de las 3 gráficas de riesgos (seguridad de las personas, riesgo medioambiental, riesgos para las instalaciones y la producción) se deben evaluar sin tener en cuenta la presencia de salvaguardias o capas de protección. La frecuencia de ocurrencia del evento indeseado (parámetro W) es la misma en las 3 gráficas.

Analizando las causas y consecuencias obtendremos tres parámetros independientes entre sí. El SG (safety gap) será el mayor de los tres obtenidos al aplicar las tres gráficas. El resultado obtenido con las gráficas de riesgo corresponde a la reducción de riesgo necesaria para dicho escenario. El SG define la diferencia (en órdenes de magnitud) entre el riesgo del escenario sin protección y el riesgo tolerable de la compañía.

Una vez determinado el SG se analiza si las capas de protección o salvaguardias son independientes del evento iniciador y de la SIF objeto del estudio, y se verifica su eficacia para reducir el riesgo significativamente. A cada capa de protección independiente (IPL) que cumpla con los requisitos esenciales, se le asigna un crédito IPL que corresponde al orden de magnitud de reducción de riesgo que proporciona.

Cada capa de protección independiente debe ser:

- **Específica:** Se diseña para evitar las consecuencias de un evento potencialmente peligroso.
- **Independiente:** La independencia requiere que su comportamiento no esté afectado por el fallo de otra capa de protección o por las condiciones que causan que otra capa de protección falle. La capa de protección debe ser también independiente de la causa de iniciación.

- **Fiable:** Se puede contar con la capa de protección para hacer lo que se diseño que hiciera.
- **Auditable:** cada capa debe estar diseñada para permitir la validación periódica de la función de protección.

Si la suma de todos los créditos IPL es menor que el SG y no hay mejores salvaguardias no-instrumentadas que reduzcan el riesgo, será necesaria una SIF y se deberá determinar el SIL mediante la siguiente fórmula:

$$SIL = SG - \Sigma \text{créditos IPL}$$

En la *Tabla 4* se observa el crédito IPL asignado a cada una de las capas de protección independiente.

CAPA DE PROTECCIÓN	COMENTARIOS	PROBABILIDAD DE FALLO TÍPICA	CRÉDITO IPL TÍPICO
Válvula antirretorno única en servicio de líquido limpio	Previene el flujo inverso (líquidos).	$10^{-1} - 10^{-2}$	1
Válvula antirretorno única en servicio de gas	Previene el flujo inverso (gases).	-	0
Dos válvulas antirretorno en serie	Dos válvulas antirretorno en serie. Previene el flujo inverso (líquidos o gases).	-	1
Disco de ruptura	En serie antes de una PSV. Servicio limpio	-	2
Disco de ruptura	En serie antes de una PSV. Servicio sucio	-	1
Válvula de alivio de presión (PSV)	Si se diseña, instala y mantiene adecuadamente previene una sobrepresión (salvo en caso de runaway). Servicio limpio.	$10^{-2} - 10^{-3}$	2
	Si se diseña, instala y mantiene adecuadamente previene una sobrepresión (salvo en caso de runaway). Servicio sucio.	10^{-2}	1
Lazo de control	Un lazo de control puede ser IPL si es independiente del suceso iniciador y de la SIF objeto de estudio	10^{-1}	1
Sistema de control específico de ciertos equipos	Compresores, hornos, calderas, etc	$10^{-1} - 10^{-2}$	1
Respuesta del operador ante las indicaciones del BPCS o alarma de 40 minutos o más	Bien documentada y con indicación clara y fiable de que tiene que realizar la acción. Tanto si se realizada o no un diagnóstico antes de ejecutar la acción.	$> 1 \times 10^{-1}$	1

Tabla 4.- Crédito de las capas de protección independiente típicas

En caso de haber varias causas que lleven a un mismo nivel SIL, se considerará si procede incrementar el nivel SIL requerido por las gráficas de riesgo (para tener en cuenta el efecto acumulativo de todas las causas) o se realizará un estudio cuantitativo más detallado.



Como resultado del estudio se pueden obtener los siguientes valores.

SIL- quiere decir que no hay ningún requisito de seguridad. En la práctica significa que se puede considerar eliminar la SIF. Sin embargo, no se podrá eliminar una SIF sin haberlo comunicado y discutido con el equipo PHA y los especialistas correspondientes.

SIL a quiere decir que no hay un requisito de seguridad especial. En la práctica significa que no se puede eliminar la SIF, pero que se puede considerar (o no) implementarla mediante el controlador y los elementos sensores o como una alarma.

Para las SIF asignadas un SIL1, SIL2 o SIL3, se debería tratar, en la medida de lo posible, de utilizar elementos sensores y finales, independientes de los del control. En caso contrario sería necesario realizar un análisis adicional de los fallos de causa común.

Para SIL4 o SIL "h" quiere decir que el riesgo es intolerable y que un único dispositivo de protección instrumentado no es suficiente, y por tanto, es necesario rediseñar el proceso.

En el caso de haber asignado un SIL-, SIL a, SIL1 o SIL 2 a una SIF con las graficas de riesgo, y confirmada la independencia de las capas de protección a las cuales un crédito IPL ha sido asignado, se da por terminado el ejercicio de asignación de SIL y determinado el SIL requerido.

En caso de haber asignado un SIL3 a una SIF mediante las graficas de riesgo, se deberá realizar un estudio más detallado y cuantitativo de los riesgos para confirmar el nivel SIL requerido.

Matrices de riesgo calibrado.

Para analizar los riesgos, es necesario definir una serie de variables a través de las cuales se pueda identificar cada uno de los escenarios posibles de fallos. Para ellos se definen los parámetros de riesgo, que bajo fallo peligroso se adjudican a las funciones instrumentadas (SIF).

Los parámetros de riesgo son:

❖ **W Frecuencias del escenario**

El propósito del parámetro **W** es estimar la frecuencia del escenario no deseado sin tener en cuenta los sistemas de seguridad. Sólo se tienen en cuenta las seguridades inherentes al proceso y sus sistemas básicos de control.

Los tipos son:

- *W1 Estimación cualitativa: el suceso no es esperable en la vida de la planta.*
[Equivalente a: $0 \leq W1 < 10^{-2} \text{ años}^{-1}$]
- *W2 Estimación cualitativa por defecto: el suceso es esperable en la vida de la planta*

[Equivalente a: $10^{-2} \text{ años}^{-1} \leq W2 < 10^{-1} \text{ años}^{-1}$]

- *W3 Estimación cualitativa: el suceso es esperable varias veces en la vida de la planta (pero no más de una vez al año).*

[Equivalente a: $10^{-1} \text{ años}^{-1} \leq W3 \leq 1 \text{ años}^{-1}$].

La tasa de fallos, así como la estimación de los parámetros de frecuencia de cada escenario están fijadas por las especificaciones internas según la *Tabla 5*.

Descripción	Frecuencias típica	W típico
Fuego externo pequeño	10010	W2
Fuego externo grande	100100	W1
Rotura de 1 tubo en intercambiador	1005	W3
Fallo eléctrico parcial	1005	W3
Fallo eléctrico general	10010	W2
Fallo de agua de refrigeración	1005	W3
Paro de bomba	1005	W3
Paro de bomba y fallo de arranque de bomba de reserva	1005	W3
Fallo 1 aéorefrigerante	1005	W2
Fallo simultáneo de 2 aéorefrigerantes	10025	W2
Fallo de un controlador (control de presión, nivel, flujo o temperatura)	10010	W2
Fallo espurio de válvula (XV)	10020	W2
Error humano	Depende del estrés	W2-W3

Tabla 5.- Frecuencia de escenarios peligrosos

❖ C Consecuencias personales

Para estimar el parámetro **C**, se deben considerar las consecuencias “potencialmente creíbles” sin las capas de protección. Se debe considerar el número de personas presentes cuando esta ocupada la zona expuesta al peligro. Para ello se necesita conocer los datos de ubicación de personal en la planta (operación, mantenimientos, etc.).

Los tipos son:

- *C0 Lesión menor en una persona.*
- *C1 Lesión moderada en una persona, sin poder resultar en una muerte.*
- *C2 Lesión seria o muy seria a una o varias personas, o una muerte.*
- *C3 Muerte de varias personas (de 2 a 9 – la media geométrica es 3)*
- *C4 Muerte de muchas personas (10 o más).*

❖ E Consecuencias medio ambientales

- *E0 Incidente sin fuga de producto o con fuga de producto pero sin consecuencias.*
- *E1 Fuga dentro del establecimiento con consecuencias mínimas conocidas, aunque suficientemente importantes como para que la Dirección de la planta tome medidas.*

- *E2 Fuga con afectación fuera del establecimiento, sin efectos negativos conocidos, que causa indignación en la comunidad local y daña la imagen de la empresa.*
- *E3 Fuga fuera del establecimiento con efectos negativos conocidos pero reversibles. Se espera que los efectos perjudiciales terminen en menos de cinco años.*
- *E4 Fuga con afectación fuera del establecimiento con efectos negativos conocidos a largo.*
- *E5 Fuga con afectación fuera del establecimiento con efectos catastróficos.*

❖ **A Consecuencias para las instalaciones y/o la producción**

El parámetro para la protección de las instalaciones y la producción debe incluir todas las pérdidas económicas:

- Costes de demolición (para eliminar equipo dañado).
- Costes de material e instalación del equipo (aproximadamente tres veces el precio del equipo).
- Costes de la interrupción de la producción. Los costes de la interrupción de la producción **NO** son debidos a la pérdida de producción sino al valor del producto que no se ha podido expedir.

Los tipos son:

- *A0 Incidente que no causa la interrupción del proceso ni daños en equipos.*
- *A1 Interrupción menor del proceso y/o daño en el equipo:*
 $10^5 \text{ €} < \text{Pérdidas Totales} \leq 10^6 \text{ €}$
- *A2 Interrupción moderada del proceso o daño en el equipo:*
 $10^6 \text{ €} < \text{Pérdidas Totales} \leq 10^7 \text{ €}$
- *A3 Interrupción severa del proceso o daño en el equipo:*
 $10^7 \text{ €} < \text{Pérdidas Totales} \leq 10^8 \text{ €}$
- *A4 Daños severos en equipos esenciales:*
 $10^8 \text{ €} < \text{Pérdidas Totales} \leq 10^9 \text{ €}$
- *A5 Daños catastróficos $> 10^9 \text{ €}$*

❖ **F Probabilidad de presencia de personas**

Es también importante considerar los escenarios de manera coherente respecto a la probabilidad de presencia de personal o ocupación de la zona expuesta al peligro (proporción de tiempo en el que la zona expuesta al peligro esta ocupada durante un periodo normal de trabajo).

- *F1 Exposición en la zona peligrosa de rara a ocasional*
- *F2 Exposición frecuente o permanente en la zona peligrosa.*

❖ **P Probabilidad de evitar las consecuencias una vez desencadenado el suceso**

Este parámetro solamente aplica a las consecuencias C2 y es el más subjetivo de todos en el procedimiento de asignación de SG. La selección del parámetro P dependerá de si es posible que el personal expuesto se dé cuenta o sea avisado del peligro, de si tendría suficiente tiempo para evacuar la zona, o de si podría mediante sus propios medios u otros prevenir las consecuencias en caso de fuga. Este parámetro depende por tanto de la velocidad con que un suceso peligroso se desarrolla, la facilidad para reconocer el peligro, la posibilidad de evitar el daño, y de la experiencia real en seguridad.

- *P1 Evitar el peligro es posible en ciertas situaciones (sólo se podrá seleccionar si está adecuadamente justificado).*
- *P2 Evitar el peligro es prácticamente imposible (parámetro por defecto).*

Seguidamente se representan las gráficas de riesgo, a través de las cuales podemos analizar el grado SIL que requiere una función instrumentada; en la *Figura 39*, las gráficas de riesgo para las personas, en la *Figura 40*, para el medio ambiente y en la *Figura 41* para las instalaciones y la producción.

RIESGO PARA LAS PERSONAS

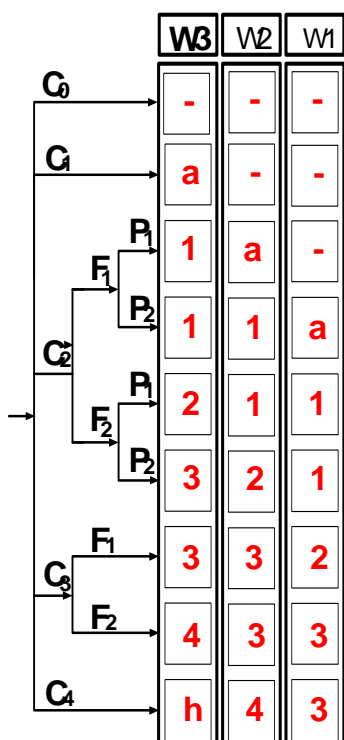


Figura 39.- Gráficas de riesgo para las personas

RIESGO MEDIO AMBIENTAL

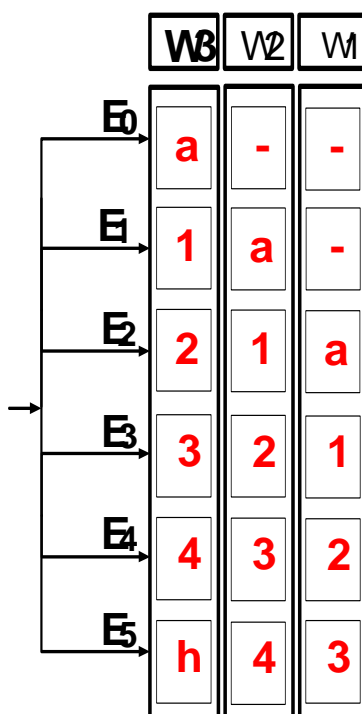


Figura 40.- Gráficas de riesgo para el medio ambiente

RIESGO PARA LAS INSTALACIONES Y LA PRODUCCIÓN

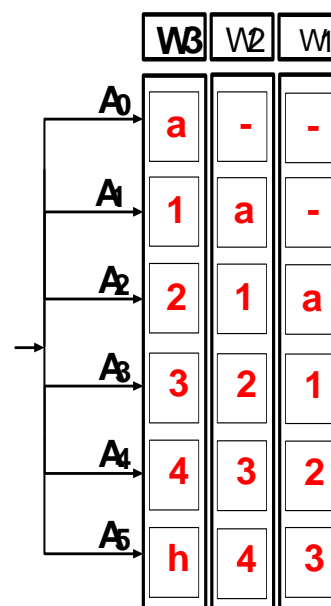


Figura 41.- Gráficas de riesgo para las instalaciones y la producción.



A continuación se representa en las siguientes tablas, *Tabla 6* y *Tabla 7*, el esquema de la ficha SIL realizada a cada función instrumentada (SIF).

Ficha utilizada en el estudio:

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad/Proyecto	
b)	Tag SIF	
c)	Servicio/equipo	
d)	Enclavamiento asociado	
e)	P&ID N°. y Revisión	
f)	Fecha	
g)	Referencia PHA	
h)	Intención del diseño	
i)	Elementos sensores	
j)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	
k)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	

Tabla 6.- Ficha SIL de Datos generales

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	
c)	Tiempo de seguridad del proceso	
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	C F P SG
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	E SG
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	A SG
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	
g)	Estudios adicionales	
h)	SIL REQUERIDO	

Tabla 7.- Ficha SIL ante Fallo peligroso en demanda



4 ESTUDIO DE MODOS DE FALLO Y NIVEL DE CONSECUENCIAS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO

El método que se ha utilizado para desarrollar esta memoria, se basa en la implementación de los documentos HAZOP existentes en la empresa en el apartado de consecuencias. De todas las unidades existentes en el esquema productivo de una refinería, el estudio se centra en aquellas que contengan las maquinarias más críticas dentro de la industria petroquímica (compresores, bombas y turbinas).

Por lo tanto se ha creado un listado, útil para la empresa, de HAZOP'S donde se puede observar el comportamiento de cada maquinaria, así como sus causas y salvaguardas, ante una variación o fallo de proceso. A partir de este estudio se ha realizado la determinación del SIL de cada de las funciones instrumentadas asociadas, instaladas para la seguridad de los operarios, medio ambiente, maquinaria y pérdidas por producción.

4.2 ANÁLISIS DE LOS FALLOS

4.2.1 Estudio de Compresores

A continuación se analizará unas unidades tipo dentro del esquema genérico de producción de una refinería visto en la *Figura 3*, las cuales disponen de compresores catalogados como críticos por la empresa, por sus condiciones operativas.

4.2.1.1 Unidad Hidrodesulfuradora de gasoleo.

Descripción del proceso

Como se dijo anteriormente en el análisis de las principales Unidades del esquema tipo de una refinería, visto en el *Capítulo 2*, la Unidad de Hidrodesulfuración de Gasoleo tiene como objetivo reducir el contenido de azufre del gasoleo, para cumplir con las especificaciones de producto en relación al contenido en Azufre.

La hidrodesulfuración es un proceso químico que requiere mezclar con la carga a la unidad (gasoil), H_2 a una determinada presión. Para conseguir que el H_2 tenga las condiciones necesarias para que se produzca la citada reacción, se debe utilizar un compresor para obtener las condiciones operativas necesarias.

El H_2 utilizado en la reacción se obtiene en las Unidades de generación H_2 , de donde es introducido a la Unidad de Hidrodesulfuración. Como se puede observar en el *P&ID 1 del Anexo 1*, la entrada de H_2 se hace pasar por 2 filtros (L-1 A/B) que trabajan intermitentemente, uno como reserva del otro, de forma que para mantenimiento no se requiera realizar una parada de la planta. El lavado de dichos filtros se realizará por medio de el mismo H_2 de alimentación, filtrándolo y recirculándolo por medio de unidades de bombeo externas a la unidad.



A continuación la alimentación se envía al depósito de aspiración del compresor de aporte, donde se mantiene la presión mediante un controlador de presión que en caso de que esta suba por encima de un valor, abre una válvula de envío de gas a la antorcha. A la entrada de H_2 se le une otra corriente de gas de reciclo procedente de la salida de la primera etapa de compresión.

El gas de salida de la primera etapa de compresión se mezcla con el reciclo de gas dulce procedente de un absorbedor de amina de alta presión, dirigiendo esta corriente hacia el depósito de aspiración del compresor de reciclo y seguidamente comprimido por medio del compresor de reciclo K-1. A continuación el gas es comprimido y enviado a la los reactores.

Características del compresor

Servicio combinado de aporte y reciclo de hidrógeno.

Tipo: Compresor alternativo lubricado.

Operación de trabajo continua

Número de etapas: 1 + 1

(Se trata de un único compresor con 2 etapas, primero la de aporte y luego la de reciclo)

Fluido de trabajo:

Compresor de aporte (1ª etapa): $H_2 + HC$

Compresor de reciclo (2ª etapa): $H_2 + HC + H_2S + H_2O$

Caudal de trabajo:

Compresor de aporte (1ª etapa): 1252.2 m³/h

Compresor de reciclo (2ª etapa): 4209 m³/h

Presión de descarga:

Compresor de aporte (1ª etapa): 40.7 Kg/cm²g

Compresor de reciclo (2ª etapa): 65.9 Kg/cm²g

Accionamiento eléctrico de una potencia estimada de 4082 KW/h

HAZOP desarrollado de la Unidad

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,...) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,...) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,...). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en el compresor, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

Se divide la Unidad Hidrosulfuradora de Gasoleo en tres nodos. Un primer nodo que comprende la línea de entrada de H_2 a la unidad hasta la llegada al depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión. Un segundo nodo que comprende dicho depósito y la línea de impulsión del primer compresor. Un tercer nodo limitado por la 1ª etapa de compresión, su descarga, el depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión, y dicha etapa de compresión (reciclo) y su descarga a los reactores.

NODO 1: Línea de alimentación de Hidrógeno

TEMPERATURA

MÁS TEMPERATURA

Causas

1. El Hidrógeno de alimentación al compresor procedente de su unidad de generación viene a elevada temperatura.

Consecuencias

Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Todas las líneas de la Unidad, así como los equipos asociados están diseñados para una temperatura de 80°C (temperatura que se considera no esperable para las condiciones del proceso).
2. Protecciones del compresor por alta temperatura:
 - Alarma de alta temperatura en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
 - Existe un SIS (**SIF.5**) que por alta temperatura, TSHH-3 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor (**SE-1**).
3. Alarma de alta temperatura TAH-1 en límite de batería de alimentación de Hidrógeno.

PRESIÓN**MÁS PRESIÓN****Causas**

1. El Hidrógeno de alimentación al compresor procedente de su unidad de generación viene a mayor presión.
2. Bloqueo de alguna válvula aguas abajo del compresor
3. Se produce un fallo del controlador de presión PC-1, que cierra de la válvula PV-1 del spill back del compresor.

Consecuencias

Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a una presión superior a la de diseño de sus líneas de impulsión por lo que no se espera daños en el mismo. Se producirían fugas por las bridas situadas en estas líneas, provocando fugas de H₂ al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Presión de diseño de líneas a 28Kg/cm²g. (Presión de impulsión 43,7 Kg/cm²g)

2. PSV-1 y PSV-2 situadas en los filtros taradas a 28 Kg/cm² g.
3. PSV-3 situada en el recipiente de alimentación tarada a 28 Kg/cm² g.
4. Alarma de alta presión PAH-1 situada a la salida del depósito de compresor de aporte.
5. Alarma de alta presión PAH-2 local situado en el recipiente de alimentación.
6. Existe un SIS (**SIF.2**) que por señal de cierre de final de carrera de la válvula XV-1 ZSH-1 y ZSL-1 (2oo2) situado a la salida de los filtros (L-1 A/B) detiene el compresor (**SE-1**).
7. PSV interna al compresor. (no representada)
8. Alarma de alta presión diferencial PDT-2 entre la entrada y salida del compresor.
9. Alarma de alta presión interna al compresor (no representada).

MENOS PRESIÓN

Causas

1. Fallo de la alimentación de H₂ desde el límite de batería
2. Obstrucción o bloqueo de los filtros.
3. Cierre espurio de la válvula de corte XV-1.

Consecuencias

El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. Instrumentación asociada al compresor.
 - Alarma de baja presión en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
2. Alarma de alta presión diferencial PDT-2 entre la entrada y salida del compresor.
3. Alarma de baja presión PAL-1 situada a la salida del depósito de compresor de aporte C-1.
4. Alarma de alta presión diferencial PDI-1 situada entre los filtros (L-1 A/B).
5. Válvulas manuales enclavadas en los filtros (L-1 A/B).
6. Existe un SIS (**SIF.2**) que por señal de cierre de final de carrera de la válvula XV-1 ZSH-1 y ZSL-1 (2oo2) situado a la salida de los filtros (L-1 A/B) detiene el compresor (**SE-1**).

OTRO

OTRA COMPOSICIÓN

Causas

1. Impurezas en el H₂ procedente de su unidad de generación.
2. Rotura de los filtros (L-1 A/B)

Consecuencias

Debido a que las válvulas no están diseñadas para trabajar con esta nueva composición, se produce la rotura de todas ellas (las de aspiración y descarga del compresor). Mal funcionamiento del compresor, rotura interna y aumento de la temperatura. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. Si instala una toma de muestras S-1 en la entrada a la unidad.
2. Filtro de reserva (Funcionamiento intermitente de los filtros).
3. Compresor con protecciones de alta temperatura (Salvaguardas indirectas):
 - Alarma de alta temperatura en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
 - Existe un SIS (**SIF.5**) que por alta temperatura, TSHH-3 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor (**SE-1**).

NODO 2: Interior del Depósito de Compresor de Aporte C-1 y línea de entrada al compresor.

TEMPERATURA**MÁS TEMPERATURA****Causas**

1. Fallo de aporte de agua de refrigeración por error humano en el cierre de una válvula manual al intercambiador del spill back del compresor que provoca la llegada de producto más caliente al depósito de aspiración del compresor.

Consecuencias

Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Todas las líneas de la Unidad, así como los equipos asociados están diseñados para una temperatura de 80°C (temperatura que se considera no esperable para las condiciones del proceso).
2. Compresor con protecciones de alta temperatura:
 - Alarma de alta temperatura en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
 - Existe un SIS (**SIF.5**) que por alta temperatura, TSHH-3 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor (**SE-1**).

NIVEL

MÁS NIVEL

Causas

1. Arrastre de líquidos procedente de la unidad de generación de H_2 .

Consecuencias

Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.1**) que por alto nivel, LSHH-1 A/B/C (2 de 3), en el depósito de compresor de aporte detiene el compresor (**SE-1**).
2. Alarma de alta vibración.
3. Depósito (C-1) provisto de demister, como el que se muestra en la
4. *Figura 42.*

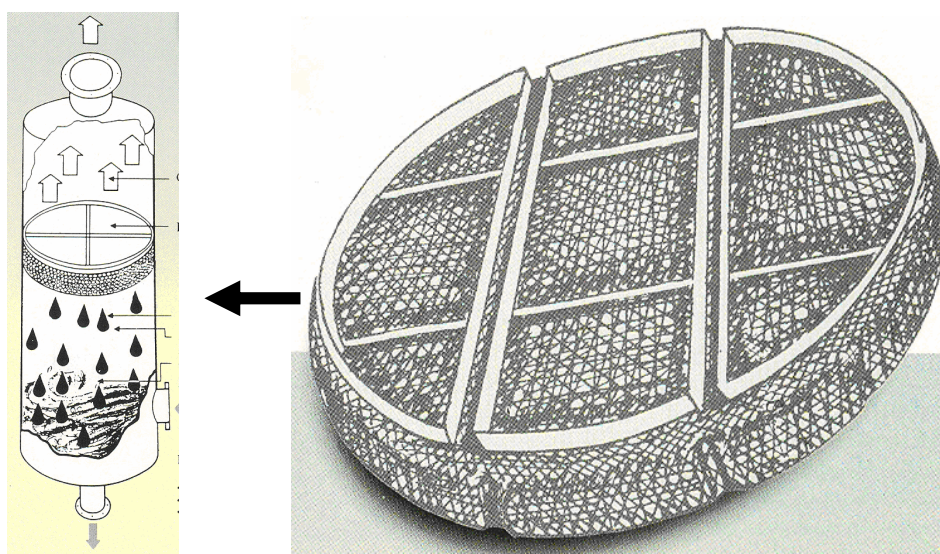


Figura 42.-Representación del Demister en un depósito

NODO 3: Salida del compresor de aporte C-1 e interior del compresor de reciclaje C-3.

TEMPERATURA

MÁS TEMPERATURA

Causas

1. El gas dulce procedente del absorbedor de amina de alta presión está por encima de la temperatura de especificación ($135\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Consecuencias

Riesgo de deficiente absorción de la amina. Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de alta temperatura TAH-2, situada a la salida del depósito de absorbedor de amina.
2. Compresor con protecciones de alta temperatura:
 - Alarma de alta temperatura en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
 - Existe un SIS (**SIF.5**) que por alta temperatura, TSHH-3 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor (**SE-1**).

MENOS TEMPERATURA**Causas**

1. El gas dulce procedente del absorbedor de amina de alta presión esta muy por debajo de la temperatura de especificación.

Consecuencias

Riesgo de deficiente absorción de la amina. La baja temperatura no es un hecho preocupante para el funcionamiento del compresor, aunque es indicativo de algún problema en el proceso. Por lo que se instala una alarma para avisar de esta situación.

Salvaguardas

1. Alarma de baja temperatura TAL-2 situada a la salida del depósito de absorbedor de amina.

PRESIÓN**MÁS PRESIÓN****Causas**

1. Si se produce un fallo espurio se cierra la válvula XV-2 situada antes de los compresores aguas arriba.

Consecuencias

Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a la misma presión de



diseño de sus líneas de aspiración por lo que se espera daños en las bridas del mismo. Se producirían fugas de H₂ al exterior por las bridas con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.4**) que por final de carrera de la válvula XV-2, ZSH-2 y ZSL-2 (2002), a la entrada al compresor de reciclo que detiene el compresor (**SE-1**).
2. Se instalan alarmas de alta presión antes de los compresores. PAH-1
3. PSV-4 en el depósito de aspiración de la 2ª etapa tarada a 52.4 Kg/cm² g.
4. PSV interna al compresor. (no representada)
5. Alarma de alta presión diferencial PDT-3 entre la entrada y salida del compresor.
6. Alarma de alta temperatura interna al compresor (no representada).

MENOS PRESIÓN

Causas

1. Menos presión en el depósito de amina.
2. Fallo del lazo de regulación del compresor.
3. Fallo del controlador LC-4 de vaciado de líquido del depósito C3 y abre la válvula LV-4.

Consecuencias

El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. Instrumentación asociada al compresor.
 - Alarma de baja presión en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
2. Alarma de alta presión diferencial PDT- 3 entre la entrada y salida del compresor.
3. PAL-3, Alarma de baja presión.
4. Existe un SIS (**SIF.3**) que por bajo nivel, LSL-2 A/B/C (2 de 3), en el depósito de aspiración del compresor de reciclo cierra la válvula XV-3. (**SE-2**)

NIVEL

MÁS NIVEL

Causas

1. Arrastre excesivo del H₂ del depósito de reciclo.
2. Se produce un fallo del controlador de nivel LC-4 y cierra la válvula LV-4 de salida del depósito de reciclo (amina rica), que se dirige al absorbedor de amina de baja presión.

Consecuencias

Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de alto nivel LAH-4 situada en el depósito de reciclo.
2. Alarma de alta vibración.
3. Existe un SIS (**SIF.6**) que por alto nivel, LSHH-2 A/B/C (2 de 3), en el depósito de aspiración del compresor detiene el compresor. (**SE-1**)

OTRO**OTRA COMPOSICIÓN****Causas**

1. Gas con mayor contenido de H_2S

Consecuencias

Debido a que las válvulas no están diseñadas para trabajar con esta nueva composición, se produce la rotura de todas ellas (las de aspiración y descarga del compresor). Mal funcionamiento del compresor, rotura interna y aumento de la temperatura. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. Diseño del compresor para poder operar en caso de emergencia con gas ácido. Ya que el compresor de reciclo está después del depósito de amina, existe una especificación API que obliga a que este diseño permita trabajar con gas ácido.

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Unidad

A continuación se determinará el nivel de seguridad que tiene cada función instrumentada mencionada con anterioridad en el estudio HAZOP de esta unidad.

Norma 1: Se considera que el turno estará formado por un operario de campo y otro de panel. El operario de campo da servicio a dos unidades gemelas por lo que se considera de forma conservadora que la presencia en planta es de un operario.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición del compresor alternativo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10^6 Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 6 semanas; mientras que si no es catastrófico no superará los 10^6 Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 2 semanas. En este caso no habrá



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

paro de la producción, ya que siempre se instalan 2 compresores alternativos en paralelo para evitarlo.

Se adjunta un listado de las funciones instrumentadas asociadas al Compresor alternativo de la Unidad analizada. (Ver P&ID 1 del Anexo 1)

- SIF.1 Protege al compresor por alto nivel en el depósito C-1.
- SIF.2 Protege al compresor por baja presión en la impulsión de la 1ª etapa.
- SIF.3 Protege al compresor por baja presión en la impulsión de la 2ª etapa.
- SIF.4 Protege al compresor por baja presión en la impulsión de la 3ª etapa.
- SIF.5 Protege al compresor de alta temperatura.
- SIF.6 Protege al compresor por alto nivel en el depósito C-3.

A continuación se analizará cada función instrumentada (SIF) de manera particular.

SIF.1

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrosulfuración
b)	Tag SIF	SIF-1
c)	Servicio/equipo	Compresor de aporte K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor K-1A/B de alto nivel en el C-1.
f)	Elementos sensores	LT-1 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresor K-1A/B
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Arrastre de líquidos procedente de la unidad de generación de H ₂ .
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 1 Minuto



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W 1 C 2 F 1 P 2 SG a	W1: La unidad de generación de H ₂ , de donde procede el Hidrógeno de aporte, ya tiene sus controladores y alarmas, por lo que según la <i>Tabla 5</i> no es esperable ocurra en la vida de la planta. C2: Como consecuencias de una fuga de H ₂ , la tendencia de esta sustancia sería a elevarse y dispersarse rápidamente. No obstante si encontrase un punto de ignición se produciría un incendio tipo Jet FIRE que podría afectar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario).
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W 1 E 1 SG -	F1: La frecuencia en la que el operario se expone a la zona peligrosa es menor del 10% de su tiempo de trabajo. P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W 1 A 2 SG a	E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas. A2: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10 ⁶ Euros y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción, se cataloga como A2.
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Sensor de vibraciones en el compresor. (0) Depósito (C-1) provisto de demister. (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a
g)	SIL REQUERIDO	SIL a

SIF.2

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrodesulfuración
b)	Tag SIF	SIF-2
c)	Servicio/equipo	Compresor de aporte K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor por baja presión en la aspiración
f)	Elementos sensores	ZSH-1 y ZSL-1 (2oo2)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresor K-1A/B (motor eléctrico) (1oo1)
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-



Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo espurio de la válvula XV-1, cerrada
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 15 Minuto
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 0 F - P - SG -
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 0 SG -
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 1 SG a
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de baja presión en el 1 ^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor (0) Alarma de alta presión diferencial PDT- 2 (0) Alarma de baja presión PAL-1 (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a
g)	SIL REQUERIDO	SIL a

SIF.3

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrosulfuración
b)	Tag SIF	SIF-3
c)	Servicio/equipo	Compresor de reciclo K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-2
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor por baja presión e la aspiración debido a un bajo nivel del depósito C-3.
f)	Elementos sensores	LT-2 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Cierre XV-3 (1oo1)



Ref	Campo	Detalle
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Falla LC-4, LV-4 abierta
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	<15 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 0 F - P - SG -
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 1 SG a
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de baja presión en el 1 ^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor (0) Alarma de alta presión diferencial PDT- 3 (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a
g)	SIL REQUERIDO	SIL a

SIF.4

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrodesulfuración
b)	Tag SIF	SIF-4
c)	Servicio/equipo	Compresor de reciclo K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-1



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor por baja presión e la aspiración
f)	Elementos sensores	ZSH-2 y ZSL-2 (2oo2)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresor K-1A/B (motor eléctrico) (1oo1)
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
h)	Causas	Falla XV-2 cerrada
i)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.
j)	Tiempo de seguridad del proceso	< 1 minuto
k)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 0 F - P - SG -
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 1 SG a
l)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de baja presión en el 1 ^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor (0) Alarma de alta presión diferencial PDT- 3 (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
m)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a
n)	SIL REQUERIDO	SIL a

SIF.5

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrodessulfuración



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
b)	Tag SIF	SIF-4
c)	Servicio/equipo	Compresor de aporte y reciclo K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger de alta temperatura al compresor.
f)	Elementos sensores	TC-3 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresor K-1A/B (motor eléctrico) (1001)
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle									
a)	Causas	<p>El Hidrógeno de alimentación al compresor procedente de su unidad de generación viene a elevada temperatura.</p> <p>Fallo de aporte de agua de refrigeración por error humano en el cierre de una válvula manual al intercambiador del spill back.</p> <p>El gas dulce procedente del absorbedor de amina de alta presión esta por encima de la temperatura de especificación.</p>									
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	<p>Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.</p>									
c)	Tiempo de seguridad del proceso	>1 hora									
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes										
	SEGURIDAD PERSONAL										W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo por error humano, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
	W	2	C	2	F	1	P	2	SG	1	
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL										
	W	2	E	1	SG	a					
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS										
W	2	A	1	SG	a	E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.					
A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería inferior a 10 ⁶ Euros, y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción, se cataloga como A1.											
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados										
Alarma de alta temperatura en el 1 ^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.(1)											



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
		(Como el tiempo de seguridad es mayor de 40 min, se le asigna un crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1-1=a
g)	SIL REQUERIDO	SIL a

SIF.6

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrodesulfuración
b)	Tag SIF	SIF-6
c)	Servicio/equipo	Compresor de reciclo K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor K-1A/B de una muy alto nivel en el C-3
f)	Elementos sensores	LT-2 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresor K-001A/B
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Arrastre excesivo del H ₂ del depósito de reciclo. Fallo del controlador de nivel LC-4, cierra la válvula LV-4.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 1 Minuto
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 2 F 1 P 2 SG 1
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	<p>W2: Según la <i>Tabla 5</i>, para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.</p> <p>C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario) sería seria pudiéndole provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE.</p> <p>F1: La frecuencia en la que el operario se expone a la zona peligrosa</p>	

Ref	Campo	Detalle
	<div>PROTECCIÓN DE ACTIVOS</div> <div>W2A2SG1</div>	<p>es menor del 10% de su tiempo de trabajo.</p> <p>P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle.</p> <p>E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.</p> <p>A2: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10⁶ Euros y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción, se cataloga como A2.</p>
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	<p>Sensor de vibraciones en el compresor. (0)</p> <p>Depósito (C-1) provisto de demister. (0)</p> <p>Alarma de alto nivel LAH-4 situada en el depósito de reciclo. (0)</p> <p>(Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)</p>
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1.
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

Seguidamente se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el estudio de determinación de SIL de las funciones instrumentadas para esta Unidad.

Enclavamiento	SIF	Descripción de Función Instrumentada de Seguridad (SIF)	SIL	Medición	Acción
SE-1	SIF.1	Protege al compresor por alto nivel en depósito C-1	a	LSHH-1 A/B/C	Paro compresor K-1 A/B
	SIF.2	Protege al compresor por baja presión en impulsión de la 1ª etapa	a	ZSH-1, ZSL-1	Paro compresor K-1 A/B
SE-2	SIF.3	Protege al compresor por baja presión en la impulsión de la 2ª etapa	a	LSLL-2 A/B/C	Cierre XV-3
SE-1	SIF.4	Protege al compresor por baja presión en la impulsión de la 3ª etapa.	a	ZSH-2, ZSL-2	Paro compresor K-2 A/B
	SIF.5	Protege al compresor de alta temperatura.	a	TSHH-3 A/B/C	Paro compresor K-2 A/B
	SIF.6	Protege al compresor por alto nivel en el depósito C-3.	1	LSHH-2 A/B/C	Paro compresor K-2 A/B

De este primer análisis, podemos observar como las SIF asociadas a alto nivel en los depósitos anteriores a los compresores K-1 y K-2 que protegen al compresor de trabajar con presencia de líquidos, son los que deben tener una menor probabilidad de fallo, ya que su SIL es mayor. Ya que sus consecuencias son más graves para los operarios, medio ambiente, instalaciones y producción. En este caso, la diferencia entre el SIF.1 y el SIF.5 en cuanto a nivel de SIL, se basa en que el fallo causante que provoca la acción de la SIF.1, es muy poco probable, aunque en ambos casos si llega a producirse,



las consecuencias serían las mismas. En esta unidad, los escenarios de seguridad y costes de activos son los que han limitado los niveles SIL obtenidos.

En cuanto a los resultados obtenidos, se debe añadir que la obtención de un SIL a para una función instrumentada quiere decir que no hay un requisito de seguridad especial. En la práctica significa que no se puede eliminar la SIF, pero que se puede considerar implementarla mediante el controlador y los elementos sensores o como una alarma.

Para el caso de obtener un SIL1 para una SIF, indica que se debe estudiar la arquitectura propuesta para la función, para comprobar que la probabilidad de fallo bajo demanda es de 0.1 a 0.01. En el cálculo de esta probabilidad, se introducen las pruebas periódicas y de mantenimiento a realizar a cada SIF. Debido a que es un SIL 1, es esperable que las pruebas periódicas coincidan con las paradas de la unidad (cada 36-48 meses). Todas estas pruebas deben estar específicamente documentadas para posteriormente ser auditables.



4.2.1.2 Unidad de Gascon de destilación.

Descripción del proceso:

Como se dijo anteriormente en el análisis de las principales Unidades del esquema tipo de una refinería, visto en el *Capítulo 2*, la Unidad de Gascon de destilación tiene como objetivo estabilizar las naftas procedentes de la Unidad de Topping (o destilación atmosférica), y obtener butanos y propanos tratados para controlar su acidez y contenido de azufre.

Como puede observarse en el *P&ID 2 del Anexo 1*, se introduce una corriente de gases procedente de la Unidad de Topping y se almacena en el depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión (C-1). El líquido del depósito de aspiración es regulado por un controlador de nivel que acciona una bomba G-1 A/B que intermitentemente envía dicho líquido a la salida del aerorrefrigerador (Analizado después).

Seguidamente el compresor, en su 1ª etapa, comprime el gas procedente del depósito C-1 y lo envía al sello de la 1ª etapa, que se trata de un sistema de acople que previene de que el gas de proceso se escape hacia el medio ambiente. A la salida del sello se le une una corriente de gas dulce (sin ácido sulfúrico), otra de agua ácida y parte de la recirculación procedente de la salida del sello de la 2ª etapa de compresión, regulada por un controlador de presión PC-4, situado a la salida del acumulador inter-etapa. A continuación la mezcla se introduce en un aerorrefrigerador donde es enfriado, llegando incluso a condensarse parcialmente. El resultado a la salida es líquido-vapor de agua hidrocarbonada mezclada, y fluye hasta el depósito acumulador inter-etapa (C-2).

En el depósito C-2 si instalan dos sensores de nivel, uno que acciona la válvula LV-5 que permite el evacuado hacia agua de lavado y otro sensor que regula la descarga de líquido condensado por medio del accionamiento de la bomba G-2.

El gas del depósito acumulador es comprimido por el compresor en su 2ª etapa. Antes de la entrada al compresor, se pone otro controlador de presión PC-3, que permite la recirculación de la salida del acumular (C-2) a la entrada del depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión (C-1).

La salida del gas de la 2ª etapa del compresor, es remitido al sello correspondiente a dicha etapa y parte es reenviada a la entrada del aerorrefrigerador de la 1ª etapa de compresión (analizado anteriormente) y el resto es mezclado con un sistema de entrada de agua ácida y dirigido al aerorrefrigerador de descarga, para después de enfriarlo, almacenarlo en un acumulador de descarga para su uso.

Características del compresor

Servicio de compresor de gas

Tipo: Compresor alternativo lubricado

Operación continua.

Número de etapas: 2

Fluido de trabajo: $H_2O + H_2 + HC + H_2S$ (En las 2 etapas)

Caudal de trabajo:

1ª etapa: 12895 m³/h

2ª etapa: 10030 m³/h



Presión de descarga:

1ª etapa: 12.13 Kg/cm²g

2ª etapa: 13 Kg/cm²g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada de 724 KW/h

HAZOP desarrollado de la Unidad

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,..) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,..) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,.). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en el compresor, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

Se divida la Unidad Gascón de Destilación en cuatro nodos. Un primer nodo que comprende la línea de entrada de crudo procedente de la unidad de Topping, el depósito de la primera etapa de compresión, la aspiración y la primera etapa de compresión. Un segundo nodo que comprende la impulsión de la primera etapa de compresión. Un tercer nodo que comprende el depósito acumulador inter-etapa y la aspiración de la 2ª etapa de compresión. Y finalmente un cuarto nodo que comprende la impulsión de la 2ª etapa.

NODO 1: Corriente de entrada de la 1ª etapa de compresión y recicló del compresor K-1 A/B.

TEMPERATURA

MÁS TEMPERATURA

Causas

1. Corriente de gases procedente de la unidad de Topping viene a elevada temperatura.
2. Corriente de gases procedente del recicló del compresor viene a elevada temperatura.

Consecuencias

Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. PSV-1 tarada a 3.5 Kg/cm²g situada en el depósito C-1, para prevenir un calentamiento por causa de fuego.
2. Protecciones del compresor por alta temperatura:
 - Alarma de alta temperatura en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.



- Existe un SIS (**SIF.4**) que por alta temperatura, TSHH-1 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor (**SE-1**).

MENOS TEMPERATURA

Causas

1. Corriente de gases procedente de la unidad de Topping viene a baja temperatura.

Consecuencias

Se produce una mayor condensación de líquidos, con posibilidad de aumento de nivel del depósito y descenso de presión en la aspiración del compresor. La baja temperatura no es un hecho preocupante para el funcionamiento del compresor, aunque es indicativo de algún problema en el proceso.

Salvaguardas

1. Carece de salvaguardas para baja temperatura porque no es un problema para el compresor.

NIVEL

MÁS NIVEL (En el depósito de aspiración del compresor C-1)

Causas

1. Fallo del controlador de nivel LC-2 situado en el depósito de aspiración del compresor.
2. Fallo y parada de la bomba de aspiración (G-1) de líquidos del depósito de aspiración del compresor.
3. Excesivo arrastre de líquidos.

Consecuencias

Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.1**) que por alto nivel, LSHH-3 A/B/C (2 de 3), en el depósito de compresor de aporte detiene el compresor (**SE-1**).
2. Se dispone de un compresor de reserva. (B en paralelo)
3. Alarma de alto nivel LAH-2 situada en el depósito de aspiración.
4. Se dispone de una bomba de reserva para no tener que detener el compresor por este fallo.
5. Alarma de alta vibración.

MENOS NIVEL (Sin problemas para el compresor)**Causas**

1. Fallo de LC-2, no se detiene la bomba G-1 durante la operación de vaciado de condensado.

Consecuencias

Cavitación de la bomba. PROBLEMA ANALIZADO EN LAS BOMBAS.

Salvaguardas

1. Alarma de muy bajo nivel LALL-3.
2. Existe un SIS que por bajo nivel, LSLL-3 A/B/C (2 de 3), en el depósito de compresor de aporte que detiene la bomba.

CAUDAL**NO CAUDAL [En entrada al depósito]
(Aplicable también a MENOS PRESIÓN)****Causas**

1. Fallo espurio y cierre de la válvula de corte XV-1, situada a la entrada al depósito de aspiración del compresor.
2. Parada no programada de la unidad de Topping.

Consecuencias

El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. Depósito diseñado a vacío para cualquier problema por la brusca bajada de presión.
2. Instrumentación asociada al compresor.
 - Alarma de baja presión en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
3. Alarma de alta presión diferencial PDT-1 entre la entrada y salida del compresor.

NO CAUDAL [En el conducto de entrada al compresor]**Causas**

1. Obstrucción en demister del depósito de aspiración del compresor.
2. Fallo de la válvula de corte XV-2 y apertura intempestiva



3. Válvula manual cerrada en línea durante la puesta en servicio del compresor de reserva.

Consecuencias

El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. Instrumentación asociada al compresor.
 - Alarma de baja presión en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
2. Alarma de alta presión diferencial PDT-1 entre la entrada y salida del compresor.

MÁS CAUDAL [En entrada al depósito] (Aplicable también a MÁS PRESIÓN)

Causas

1. Envío de mayor cantidad de gases de cabeza procedentes de la unidad de Topping.
2. Fallo del controlador de presión y apertura de la válvula de control PV-3.

Consecuencias

Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a una presión superior a la de diseño de sus líneas de impulsión por lo que no se espera daños en el mismo. Se producirían fugas por las bridas situadas en estas líneas, provocando fugas de H₂ al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. PSV-1 tarada a 3.5 Kg/cm²g situada en el depósito C-1 con disparo a la antorcha.
2. Seguridades de diseño del compresor.
 - PSV interna al compresor. (no representada)
 - Alarma de alta presión interna al compresor (no representada).

OTRA

OTRA COMPOSICIÓN

Causas

1. Corriente de gases procedente de la unidad de Topping fuera de especificación.

(Como siempre se ha de analizar en el HAZOP las condiciones más desfavorables, esta se asocia a una corriente más pesada.)

Consecuencias

Debido a que las válvulas no están diseñadas para trabajar con esta nueva composición, se produce la rotura de todas ellas (las de aspiración y descarga del compresor). Mal funcionamiento del compresor, rotura interna y aumento de la temperatura. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. Compresor con protecciones de alta temperatura:
 - Alarma de alta temperatura en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.

OTRA FASE (En aspiración del compresor)**Causas**

1. Rebose de líquidos en el depósito de aspiración (Ya analizado en más nivel)
2. Arrastre de gotas procedentes del depósito de aspiración del compresor.

Consecuencias

Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Depósito (C-1) provisto de demister
2. Alarma de alta vibración.
3. Existe un SIS (**SIF.1**) que por alto nivel, LSHH-3 A/B/C (2 de 3), en el depósito de compresor de aporte detiene el compresor (**SE-1**).
4. Se dispone de un compresor de reserva. (B en paralelo)

NODO 2: Impulsión de la 1ª etapa del compresor K-1 A/B**TEMPERATURA
MÁS TEMPERATURA****Causas**

1. Fallo de la refrigeración en el compresor.

Consecuencias

Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

3. PSV-1 tarada a 5 Kg/cm²g situada en el depósito C-2, para prevenir un calentamiento por causa de fuego.
4. Protecciones del compresor por alta temperatura:
 - Alarma de alta temperatura en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
 - Existe un SIS (**SIF.4**) que por alta temperatura, TSHH-1 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor (**SE-1**).

CAUDAL**NO CAUDAL [Entrada al aerorrefrigerante inter-etapa]****Causas**

1. Fallo humano y cierre de la válvula manual en línea.

Consecuencias

Presurización peligrosa de la 1^a etapa de compresión. Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a la misma presión de diseño de sus líneas de aspiración por lo que se espera daños en las bridas del mismo. Se producirían fugas de H₂ al exterior por las bridas con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. PSV-3 tarada a 5 Kg/cm²g situada a la salida de la 1^a etapa de compresión.
2. PSV interna al compresor. (no representada)
3. Alarma de alta presión diferencial PDT-1 entre la entrada y salida del compresor.
4. Alarma de alta temperatura interna al compresor (no representada).

MÁS CAUDAL [Entrada al aerorrefrigerante inter-etapa]**Causas**

1. Fallo del sistema de regulación del compresor, manteniendo el equipo en un régimen superior al deseable.
2. Fallo espurio y apertura de XV-2 con envío de gas a la antorcha
3. Ensuciamiento del demister de C-1
4. Baja presión procedente de la Unidad de Topping

Consecuencias

El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.2**) que por baja presión, PSLL-2 A/B/C (2 de 3), a la entrada la 1ª etapa del compresor detiene el compresor (**SE-1**).
2. Instrumentación asociada al compresor.
 - Alarma de baja presión en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
3. Alarma de alta presión diferencial PDT-1 entre la entrada y salida del compresor.
4. PSV interna al compresor (no representada).
5. Alarma de alta presión interna al compresor (no representada).

INVERSO CAUDAL

[De agua en el tramo entre impulsión de 1ª etapa y sello]

Causas

1. El Stripper de la Unidad Desulfuradora de Gasoleo se encuentra parado mientras el compresor sigue trabajando.
2. Altura insuficiente del sello.

Consecuencias

Riesgo de envío de gas hacia el stripper. Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Sello. Se debe de comprobar que la altura del sello es superior al punto más alto de inyección de agua.
2. Alarma de alta vibración.

PRESIÓN**MÁS PRESIÓN****Causas**

1. Fallo del controlador de presión PC-4 con apertura de PV-4.

Consecuencias

Presurización de la aspiración de la 2ª etapa de compresión. Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a la misma presión de diseño de sus líneas de aspiración por lo que se espera daños en las bridas del mismo. Se producirían fugas de H₂ al exterior por las bridas con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición. Presurización peligrosa de la 1ª etapa de compresión.

Salvaguardas

1. Alarma de alta presión PAH-5 situada a la aspiración de la 2ª etapa de compresión.
2. Alarma de alta presión diferencial PDT-1 entre la entrada y salida del compresor.
3. PSV interna al compresor (no representada).
4. Alarma de alta presión interna al compresor (no representada).

NODO 3: Acumulador C-2 y aspiración de la 2ª etapa del compresor K-1 A/B.**TEMPERATURA****MÁS TEMPERATURA****Causas**

1. Parada del aerorrefrigerante inter-etapas.

Consecuencias

Alta temperatura a la salida del aerorrefrigerador. Mala condensación de la corriente gaseosa con entrada de gas más pesado a la aspiración de la 2ª etapa de compresor. Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Dos Alarmas de estado XA-2 y XA-2, en el aerorrefrigerador inter-etapas que indican su estado de parada o marcha.
2. Alarma de alta temperatura TAH-2.
3. Protecciones del compresor por alta temperatura:
 - Alarma de alta temperatura en el 1º depósito anti-pulsatorio del compresor.
 - Existe un SIS (**SIF.4**) que por alta temperatura, TSHH-1 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor (**SE-1**).

NIVEL**MÁS NIVEL**

Causas

1. Fallo del controlador de nivel LC-5, que cierra la válvula de control LV-5 de descarga a agua de lavado.
2. Fallo de controlador de nivel LC-7 que cierra la válvula de control FV-7 a la salida del gas a través de la bomba de aspiración del separador.
3. Fallo y paro de las bombas de succión del líquido del interior del separador inter-etapas

Consecuencias

Posibilidad de llegada de agua a la corriente de hidrocarburo. La salida neta de agua de lavado del sistema queda anulada y con el tiempo podría llegar agua al stripper. Posibilidad de llegada de líquido a la aspiración de la 2ª etapa del compresor y riesgo de daño a compresor. Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.3**) que por alto nivel, LSHH-8 A/B/C (2 de 3), situado en el separador que detiene el compresor (**SE-1**).
2. Alarma de alta vibración.

MENOS NIVEL (Sin problemas para el compresor)**Causas**

1. Fallo del controlador de nivel LC-5, que abre la válvula de control LV-5 de descarga a agua de lavado.
2. Fallo de controlador de nivel LC-7 que abre la válvula de control FV-7 a la salida del gas a través de la bomba de aspiración del separador.

Consecuencias

Problemas operativos. Cavitación de la bomba. PROBLEMA ANALIZADO EN LAS BOMBAS.

Salvaguardas

1. Existe un SIS que por alto nivel, LSHH-8 A/B/C (2 de 3), situado en el separador detiene la bomba. (SE-)

PRESIÓN**MÁS PRESIÓN (En separador inter-etapa)****Causas**

1. Parada del aerorrefrigerante inter-etapas.

Consecuencias

Alta temperatura a la salida del aerorrefrigerador. Mala condensación de la corriente gaseosa con entrada de gas más pesado a la aspiración de la 2ª etapa de compresor. Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a la misma presión de diseño de sus líneas de aspiración por lo que se espera daños en las bridas del mismo. Se producirían fugas de H₂ al exterior por las bridas con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Dos Alarmas de estado XA-2 y XA-2, en el aerorrefrigerador inter-etapas que indican su estado de parada o marcha.
2. Alarma de alta temperatura TAH-2.
3. Alarma de alta presión diferencial PDT-2 entre la entrada y salida del compresor.
4. PSV interna al compresor (no representada).
5. Alarma de alta presión interna al compresor (no representada).

NODO 4: Impulsión de la 2ª etapa de compresor K- 1 A/B**TEMPERATURA (A la salida de la 2ª etapa del compresor)
MÁS TEMPERATURA****Causas**

1. Fallo de aerorrefrigerante inter-etapa en el compresor

Consecuencias

Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Protecciones del compresor por alta temperatura:
 - Alarma de alta temperatura en el 1^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.
 - Existe un SIS (**SIF.4**) que por alta temperatura, TSHH-1 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor (**SE-1**).

CAUDAL**NO CAUDAL [A la salida de la 2ª etapa del compresor]**

Causas

1. Cierre manual por acción no programada de la válvula XV-4 situada después del sello de la 2ª etapa de compresión.

Consecuencias

Aumento de presión en la impulsión del compresor. Presurización anómala de línea de salida de la 2ª etapa de compresión. Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a la misma presión de diseño de sus líneas de aspiración por lo que se espera daños en las bridas del mismo. Se producirían fugas de H₂ al exterior por las bridas con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición. Presurización peligrosa de la 1ª etapa de compresión.

Salvaguardas

1. Recirculación del compresor a través de una válvula PV-4 que comunica la salida del sello de la 2ª etapa de compresión, con la salida del sello de la 1ª etapa.
2. Alarma de alta presión PAH-8 situada antes de la entrada del sello de la 2ª etapa de compresión.
3. PSV-4 tarada a 13 Kg/cm²g situada a la salida de la 2ª etapa de compresión.
4. Alarma de alta presión diferencial PDT-2 entre la entrada y salida del compresor.
5. PSV interna al compresor (no representada).
6. Alarma de alta presión interna al compresor (no representada).

MENOS CAUDAL [A la entrada del aerorrefrigerante de descarga]**Causas**

1. Cese de aporte de agua de lavado procedente de un depósito independiente de agua impulsada por una bomba externa a esta unidad.

Consecuencias

Presencia de SH₂ en concentraciones que pueden propiciar corrosión. Riesgo de corrosión en el aerorrefrigerante ante situación prolongada de ausencia de lavado. Sin consecuencias para la seguridad del compresor.

Salvaguardas

1. Control de aporte agua FC-1 procedente del depósito de aporte de agua de lavado a la unidad.

INVERSO CAUDAL***[De agua en el tramo entre impulsión de segunda etapa y sello]*****Causas**

1. Altura insuficiente del sello.

Consecuencias

Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Diseño de la altura del sello en la impulsión de la 2ª etapa de compresión superior al punto más alto de inyección de agua.

PRESIÓN**MÁS PRESIÓN****Causas**

1. Cierre manual por acción no programada de la válvula XV-4 situada después del sello de la 2ª etapa de compresión
2. Cierre de válvulas manuales en línea durante operación de puesta en marcha del compresor.

Consecuencias

Aumento de presión en la impulsión del compresor. Presurización anómala de línea de salida de la 2ª etapa de compresión. Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a la misma presión de diseño de sus líneas de aspiración por lo que se espera daños en las bridas del mismo. Se producirían fugas de H₂ al exterior por las bridas con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición. Presurización peligrosa de la 1ª etapa de compresión.

Salvaguardas

1. Recirculación del compresor a través de una válvula PV-4 que comunica la salida del sello de la 2ª etapa de compresión, con la salida del sello de la 1ª etapa.
2. Alarma de alta presión PAH-8 situada antes de la entrada del sello de la 2ª etapa de compresión.
3. PSV-4 tarada a 13 Kg/cm²g situada a la salida de la 2ª etapa de compresión.
4. Alarma de alta presión diferencial PDT-2 entre la entrada y salida de la 2ª etapa del compresor.
5. PSV interna al compresor (no representada).
6. Alarma de alta presión interna al compresor (no representada).

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Unidad

A continuación se determinará el nivel de seguridad que tiene cada función instrumentada mencionada con anterioridad en el estudio HAZOP de esta unidad.



Norma 1: Se considera que el turno estará formado por un operario de campo y otro de panel. El operario de campo únicamente da servicio a esta Unidad.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición del compresor alternativo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10^5 Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 6 semanas; mientras que si no es catastrófico también será de 10^5 Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 2 semanas. En este caso no habrá paro de la producción, ya que siempre se instalan 2 compresores alternativos en paralelo para evitarlo.

Se adjunta un listado de las funciones instrumentadas asociadas al compresor alternativo de la Unidad analizada. (Ver P&ID 2 del Anexo 1)

- SIF.1 Protege al compresor por alto nivel en el depósito C-1.
- SIF.2 Protege al compresor de muy baja presión en aspiración de su 1ª etapa.
- SIF.3 Protege al compresor por alto nivel en el acumulador inter-etapa .
- SIF.4 Protege al compresor por alta temperatura

A continuación se analizará cada función instrumentada (SIF) de manera particular.

SIF.1

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de destilación.
b)	Tag SIF	SIF-1
c)	Servicio/equipo	1ª etapa del compresión K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger a los compresores K-1 A/B por presencia de líquidos.
f)	Elementos sensores	LT-3 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresores offgas K-1 A/B.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cerrar XV-1 a la entrada al depósito Cerrar XV-3 a la salida de la 2ª etapa de compresión

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	1. Fallo del controlador de nivel LC-2 situado en el depósito de aspiración del compresor. 2. Fallo y parada de la bomba de aspiración (G-1) de líquidos del depósito de aspiración del compresor. 3. Excesivo arrastre de líquidos.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle								
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.								
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min (Considerando que el controlador es el fallo limitante)								
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes									
	SEGURIDAD PERSONAL									
	W	2 3 1	C	2 2 2	F	1 1 1	P	2 2 2	SG	1 1 a
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL		W1: El arrastre de líquidos no es un evento esperado en la vida de la planta, ya que la unidad de Topping tiene sus salvaguardas propias para evitarlo.							
	W		2 3 1	E	1 1 1	SG	a 1 -	C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario) sería seria pudiéndole provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE.		
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS		F1: La frecuencia en la que el operario se expone a la zona peligrosa es menor del 10% de su tiempo de trabajo.							
		P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarlo.								
		E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.								
		A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción, se cataloga como A1.								
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alto nivel LAH-2 situada en el depósito de aspiración(0/1/0) Se dispone de una bomba de reserva para no tener que detener el compresor por este fallo.(0/0/0) Alarma de alta vibración.(0/0/0) (Como se ha considerado que el controlador es el fallo limitante, y como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se les puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma).								
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1								
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1								

SIF.2

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de destilación.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
b)	Tag SIF	SIF-2
c)	Servicio/equipo	Compresores K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger a los compresores K-1 A/B por baja presión a la entrada.
f)	Elementos sensores	PT-2 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresores offgas K-1 A/B.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cerrar XV-1 a la entrada al depósito Cerrar XV-3 a la salida de la 2º etapa de compresión

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	1. Fallo del sistema de regulación del compresor, manteniendo el equipo en un régimen superior al deseable. 2. Fallo espurio y apertura de XV-2 con envío de gas a la antorcha 3. Ensuciamiento del demister de C-1 4. Baja presión procedente de la Unidad de Topping
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	<15 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 2 1 2 C 0 0 0 F 1 1 1 P 2 2 2 SG - - - -
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 2 1 2 E 0 0 0 SG - a - -
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 1 1 1 SG a a a a
	W2: Para darse estas causas debe de fallar un controlador o una válvula de corte de unidades anteriores, por lo que según la <i>Tabla 5</i> , es un evento esperado en la vida de la planta.	
	W1: El demister es verificado por los operarios de campo al menos una vez por turno (8 horas), por lo que no es un evento esperado.	
	W2: La bajada de presión, por el contrario que dijimos del arrastre de líquidos, si que es un evento esperado en la vida de la planta.	
C0: Al no haber fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario es nula o muy leve, sin requerimiento de baja médica.		
E0: Incidente sin fugas al exterior. Sin consecuencias medioambientales.		
E1: En el caso de fallo espurio y apertura de XV-2, se observa que todo el gas de tratamiento es enviado a la antorcha por lo que se puede considerar que hay consecuencias medioambientales. Tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.		
A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros, y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción, se cataloga como A1.		
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de baja presión en el 1 ^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.(0/0/0/0)



Ref	Campo	Detalle
		<p>Alarma de alta presión diferencial PDT-1 entre la entrada y salida del compresor.(0/0/0/0)</p> <p>PSV interna al compresor (no representada). Sería necesario detallar el tarado y el caso de diseño de esta PSV para poder darle crédito. (0/0/0/0)</p> <p>Alarma de alta presión interna al compresor (0)</p> <p>(Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)</p>
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a
g)	SIL REQUERIDO	SIL a

SIF.3

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de destilación.
b)	Tag SIF	SIF-3
c)	Servicio/equipo	Compresor K-1 A/B.
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger a los compresores K-1 A/B de presencia de líquidos.
f)	Elementos sensores	LT-8 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresores offgas K-1 A/B.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	<p>Cerrar XV-1 a la entrada al depósito</p> <p>Cerrar XV-3 a la salida de la 2º etapa de compresión</p>

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	<p>Fallo del controlador de nivel LC-5, que cierra la válvula de control LV-5 de descarga a agua de lavado.</p> <p>Fallo de controlador de nivel LC-7 que cierra la válvula de control FV-7 a la salida del gas a través de la bomba de aspiración del separador.</p> <p>Fallo y paro de las bombas de succión del líquido del interior del separador inter-etapas</p>
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	<p>Posibilidad de llegada de agua a la corriente de hidrocarburo. La salida neta de agua de lavado del sistema queda anulada y con el tiempo podría llegar agua al stripper. Posibilidad de llegada de líquido a la aspiración de la 2ª etapa del compresor y riesgo de daño a compresor.</p> <p>Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.</p>
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta. C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario) sería seria pudiéndole provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE.
	W 2 C 2 F 1 P 2 SG 1	F1: La frecuencia en la que el operario se expone a la zona peligrosa es menor del 10% de su tiempo de trabajo. P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle.
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.
	W 2 E 1 SG a	A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción, se cataloga como A1.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W 2 A 1 SG a	
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alta vibración (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.4

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de destilación.
b)	Tag SIF	SIF-4
c)	Servicio/equipo	Compresor de aporte y reciclo K-1 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger de alta temperatura en el compresor TSHH-1 A/B/C.
f)	Elementos sensores	TC-1 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro compresor K-1 A/B (motor eléctrico) (1001)
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle									
a)	Causas	Fallo de la aerorrefrigerante inter-etapa en el compresor El Hidrógeno de alimentación al compresor procedente de su unidad de generación viene a elevada temperatura. El gas dulce procedente del absorbedor de amina de alta presión esta por encima de la temperatura de especificación.									
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.									
c)	Tiempo de seguridad del proceso	> 1 hora									
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes										
	SEGURIDAD PERSONAL										
	W	2	C	2	F	1	P	2	SG	1	
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL										
	W	2	E	1	SG	a					
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS										
	W	2	A	1	SG	a					
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alta temperatura en el 1 ^{er} depósito anti-pulsatorio del compresor.(0) Alarma de alta temperatura TAH-2. (1) (Como el tiempo de seguridad es mayor de 40 min, se le asigna un crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)									
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1-1=a									
g)	SIL REQUERIDO	SIL a									

Seguidamente se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el estudio de determinación de SIL de las funciones instrumentadas para esta Unidad.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Enclavamiento	SIF	Descripción de Función Instrumentada de Seguridad (SIF)	SIL	Medición	Acción
SE-1	SIF.1	Protege al compresor por alto nivel en el depósito C-1.	1	LSHH-3 A/B/C	Paro de compresor K-1 A/B Cerrar XV-1 Cerrar XV-3
	SIF.2	Protege al compresor de muy baja presión en aspiración	a	PSLL-2 A/B/C	
	SIF.3	Protege al compresor por alto nivel en el acumulador inter-etapa.	1	LSHH-8 A/B/C	
	SIF.4	Protege al compresor por alta temperatura.	a	TSHH-1 A/B/C	

En este estudio de la Unidad Gascon de destilación, se vuelve a verificar la relevancia de la entrada de líquido al compresor como principal problema de funcionamiento, ya que tenemos niveles SIL superiores.

En esta unidad los niveles SIL están limitados por la protección para las personas principalmente.

Para las funciones instrumentadas que tiene SIL a no requieren de seguridad especial. En la práctica significa que no se puede eliminar la SIF, pero que se puede considerar implementarla mediante el controlador y los elementos sensores o como una alarma.

SIL1 para una SIF, indica que se debe estudiar la arquitectura propuesta para la función, para comprobar que la probabilidad de fallo bajo demanda es de 0.1 a 0.01. En el cálculo de esta probabilidad, se introducen las pruebas periódicas y de mantenimiento a realizar a cada SIF. Debido a que es un SIL.1, es esperable que las pruebas periódicas coincidan con las paradas de la unidad. Todas estas pruebas deben estar específicamente documentadas para posteriormente ser auditables.



4.2.1.3 Unidad de Hidrocracker

Descripción del proceso

Como se dijo anteriormente en el análisis de las principales Unidades del esquema tipo de una refinería, visto en el *Capítulo 2*, la Unidad de Hidrocracker tiene como objetivo transformar los destilados pesados de vacío y coquer en productos más ligeros, fundamentalmente GLP, nafta, queroseno y gasóleo. Las reacciones tienen lugar en condiciones severas de presión y temperatura en presencia de hidrógeno y catalizadores. Debido a estas condiciones de trabajo, se requiere un compresor K-1 de una gran capacidad, en cuanto a caudal de trabajo y aumento de presión se refiere.

Como puede observarse en el *P&ID 3 del Anexo 1*, tenemos 3 corrientes de entrada antes de enviar el producto a los reactores. Por un lado tenemos la alimentación fría o HC, procedente del tren de precalentamiento de la fraccionadora, por otro lado tenemos una recirculación procedente del compresor K-2 y finalmente tenemos la entrada de H_2 de aporte procedente de la unidad generadora de H_2 .

Analizando primero la entrada de HC a la Unidad de Hidrocracker, se observa que el alimento es enviado al lavado automático que proporciona el filtro L-1; y seguidamente al depósito C-5, de donde la bomba, G-1 accionada por un controlador de flujo, envía el producto hacia el tren de intercambiador de calor anterior a los reactores. El agente anti-contaminante es generalmente inyectado en una corriente en el tren de precalentamiento pero en otra conexión distinta a la de la bomba G-1.

Por otro lado, el H_2 de aporte es generado en sus unidades y posteriormente enviado a los filtros L-2 A/B donde se eliminan sus impurezas. A continuación el H_2 llega al recipiente de aspiración de la 1ª etapa de compresión. Desde allí, es comprimido por el compresor K-2. El compresor tiene 3 etapas con un intercambiador aéreo y un depósito de aspiración entre cada una de ellas. La presión de cada uno de los depósitos de aspiración es regulada por medio de spill back (recirculación interna) individuales por cada etapa de compresión.

La presión de reacción es controlada a través de válvulas de control de presión (PSV) situadas en las líneas de spill back de los compresores, por medio de las cuales se regula el flujo de H_2 enviado a la reacción.

El gas hidrogenado que sale de la 3ª etapa de compresión se mezcla con el gas de reciclo (gas dulce) procedente del compresor de reciclo (K-2) y son enviadas al tren de intercambio de calor; donde la mezcla es calentada en contracorriente con el flujo procedente de la cadena de reactores.

Por otro lado, el gas de reciclo es comprimido en el compresor de gas de reciclo K-2, accionado por una turbina de vapor. El flujo de gas de reciclo es controlado por medio de la variación de vapor de alta presión que circula por la turbina, que controla el funcionamiento del compresor para mantener el ratio H_2/HC de las especificaciones. Asimismo dispone de un control anti-surge, encargado de reenviar el producto de salida del compresor de reciclo a la entrada del mismo, en caso de bajada de presión a la entrada.

El principal objetivo de este tratamiento catalítico del hidrógeno, es hidrogenar el nitrógeno orgánico contenido en la corriente de alimentación a la unidad.



Características de los compresores

K-1

Servicio de compresor de hidrógeno

Tipo: Compresor alternativo lubricado

Operación continua

Número de etapas: 3

Fluido de trabajo: $H_2 + HC$ (En las 3 etapas)

Caudal de trabajo:

1ª etapa: 7617.7 m³/h

2ª etapa: 3785.1 m³/h

3ª etapa: 1887.7 m³/h

Presión de descarga:

1ª etapa: 47.3 Kg/cm²g

2ª etapa: 96.9 Kg/cm²g

3ª etapa: 198.4 Kg/cm²g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada de 16200 KW/h

K-2

Servicio de compresor de reciclo de hidrógeno.

Compresor centrífugo lubricado

Operación continua

Número de etapas: 1

Fluido de trabajo: $H_2 + HC + H_2S + H_2O$

Caudal de trabajo: 6447 m³/h

Presión de descarga: 198.4 Kg/cm²g

Accionamiento por una turbina, proporcionando una potencia de 10000 KW/h

HAZOP desarrollado de la Unidad

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,..) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,..) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,.). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en el compresor, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

Se divide la Unidad de Hidrocracker en dos nodos. Un primer nodo que comprende el H_2 de reciclo procedente del absorbedor de amina de alta presión, el depósito de aspiración del compresor de reciclo y las líneas de aspiración y descarga del compresor K-2. Y un segundo nodo que comprende la línea de H_2 de aporte, los depósitos de aspiración de las 3 etapas de compresión, y las líneas asociadas de aspiración y descarga de las 3 etapas de compresión.

NODO1: Hidrógeno de reciclo, depósito C-1, compresor K-2 (centrífugo) y sus líneas de aspiración e impulsión.

TEMPERATURA

MÁS TEMPERATURA



Causas

1. Gas procedente de la cabeza del absorbedor de amina de alta presión a elevada temperatura.
2. Mayor peso molecular de la composición del gas

Consecuencias

Si se supera la temperatura de diseño, habrá perturbaciones en la operación del compresor. Primero en caso extremo rozarán los alabes con la parte interior de la carcasa. Por lo que sufrirá vibraciones con una posible rotura de los cierres y el impulsor. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Diseñado para trabajar hasta una temperatura de 109 °C. (Temperatura que se considera no esperable para las condiciones de proceso.

PRESIÓN

MÁS PRESIÓN

Causas

1. Por error humano se cierra una válvula manual en la descarga del compresor

Consecuencias

Alta presión en el recipiente C-1 de aspiración del compresor y fraccionadora. Baja velocidad del compresor. Aumento de presión en la succión del compresor. Daños al compresor, por lo que aumentará el flujo de gas y el motor es incapaz de presurizar tanto gas. Se producirá una sobrecarga en el motor, llegando posiblemente a la rotura.

Si la sobrepresión se produce más levemente pero de forma repetitiva, puede llegar a romper los cierres del compresor. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Circuito diseñado a la presión de shut-off del compresor (217 Kg/cm²g).

NIVEL

MÁS NIVEL

Causas

1. Arrastre de aminas del depósito absorbedor situado aguas arriba del depósito de aspiración del compresor K-2.

Consecuencias

Riesgo de arrastre de líquidos al compresor. Si estos líquidos vienen de manera constante y en pequeñas cantidades, se producirá una erosión en los alabes y rotura de los cierres de gas. Desequilibrado de cojinetes y fallo en la lubricación. Más adelante comenzará a vibrar, disminuyendo notablemente su rendimiento. Si por el contrario la cantidad de líquido es considerable, el fallo y la rotura se producirán rápidamente, rompiendo toda la parte mecánica e hidráulica del compresor con fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición con posibilidad de fuga al exterior.

Salvaguardas

1. Alarma de alto nivel LAH-1 situada en el depósito de aspiración del compresor de reciclo.
2. Existe un SIS (**SIF.1**) que por alto nivel, LSHH-3 A/B/C (2 de 3), situado en el depósito de aspiración del compresor de reciclo detiene el compresor (**SE-1**).

NODO 2: Compresores K-1 A/B. Recipientes y líneas asociadas.**TEMPERATURA****MÁS TEMPERATURA****Causas**

1. Entrada de Hidrógeno de aporte a elevada temperatura.
2. Fallo del controlador de temperatura TC-2 situado a la salida del enfriador de la 1ª etapa de compresión que regula su funcionamiento.
3. Fallo del controlador de temperatura TC-3 situado a la salida del enfriador de la 2ª etapa de compresión que regula su funcionamiento.

Consecuencias

Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1.
 - a. Alarma de alta temperatura TAH-1 entrada a la unidad
2.
 - a. Alarma de alta temperatura TAH-4 situada a la salida de la 1ª etapa de compresión.
 - b. Existe un SIS (**SIF.2**) que por alta temperatura, TSHH-5 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor de hidrógeno (**SE-2**).
3.
 - a. Alarma de alta temperatura TAH-6 situada a la salida de la 2ª etapa de compresión.

- b. Existe un SIS (**SIF.3**) que por alta temperatura, TSHH-7 (2 de 3), a la salida del compresor detiene el compresor de hidrógeno (**SE-2**).

MENOS TEMPERATURA

Causas

1. Fallo del controlador de temperatura TC-2 situado a la salida del enfriador de la 1ª etapa de compresión que regula su funcionamiento.
2. Fallo del controlador de temperatura TC-3 situado a la salida del enfriador de la 2ª etapa de compresión que regula su funcionamiento.

Consecuencias

Riesgo de deficiente absorción de la amina. La baja temperatura no es un hecho preocupante para el funcionamiento del compresor, aunque es indicativo de algún problema en el proceso.

Salvaguardas

Al no ser un problema para el compresor carece de salvaguardas.

PRESIÓN

MÁS PRESIÓN

Causas

1. El hidrógeno procedente de sus unidades de generación, viene a una elevada presión (en el límite de batería).
2. Fallo del controlador de presión PC-5 situado en el depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión, que provoca la apertura de la válvula PV-6 situada en el conducto de reciclo de H₂ proveniente del depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión.
3. Fallo del controlador de presión PC-6 situado en el depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión, que provoca la apertura de la válvula PV-7 situada en el conducto de reciclo de H₂ proveniente del depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión.
4. Fallo del controlador de presión PC-7 situado en el depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión, que provoca la apertura de la válvula PV-8.
5. Fallo espurio y cierre de la válvula de corte XV-1 situada entre la salida de la 3ª etapa de compresión.
6. Alta presión de línea de impulsión del compresor K-2.

Consecuencias

Si se aumenta mucho la presión en el compresor pueden llegar a producirse fugas por las bridas. En este caso el compresor está diseñado a la misma presión de diseño de sus líneas de aspiración por lo que se espera daños en las bridas del mismo. Se producirían fugas de H₂ al exterior por las bridas con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1.
 - a. Presión de diseño del circuito (filtros y líneas) 28 Kg/cm²g igual a la presión de diseño de líneas y equipos (hidrógeno) en límite de batería.
 - b. Controlador de presión PC-5 situado en el depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión, que cierra la válvula PV-6.
 - c. PSV-1 tarada a 28 Kg/cm²g situada en el filtro de hidrógeno (En realidad tenemos 2 PSV, una por cada uno de los filtros, pero como ambos filtros trabajan intermitentemente de modo que el sistema sea continuo, nunca saltaran ambas PSV a la vez)
 - d. PSV-2 tarada a 28 Kg/cm²g situada en el depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión.
 - e. PSV-3 tarada a 52.5 Kg/cm²g situada a la salida de la 1ª etapa de compresión.
2.
 - a. Controlador de presión PC-6 situado en el depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión, que cierra la válvula PV-7.
 - b. Controlador de presión PC-7 situado en el depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión, que cierra la válvula PV-8.
 - c. PSV-1 tarada a 28 Kg/cm²g situada en el filtro de hidrógeno (En realidad tenemos 2 PSV, una por cada uno de los filtros, pero como ambos filtros trabajan intermitentemente de modo que el sistema sea continuo, nunca saltaran ambas PSV a la vez)
 - d. PSV-2 tarada a 28 Kg/cm²g situada en el depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión.
 - e. PSV-3 tarada a 52.5 Kg/cm²g situada a la salida de la 1ª etapa de compresión.
3.
 - a. Controlador de presión PC-7 situado en el depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión, que cierra la válvula PV-8.
 - b. PSV-4 tarada a 52.5 Kg/cm²g situada en el depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión.
 - c. PSV-5 tarada a 106.5 Kg/cm²g situada a la salida de la 2ª etapa de compresión.
4.
 - a. PSV-6 tarada a 106.5 Kg/cm²g situada en el depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión.
 - b. PSV-7 tarada a 217 Kg/cm²g situada a la salida de la 3ª etapa de compresión.
5.
 - a. PSV-7 tarada a 217 Kg/cm²g situada a la salida de la 3ª etapa de compresión.
6.
 - a. PSV-7 tarada a 217 Kg/cm²g situada a la salida de la 3ª etapa de compresión.

MENOS PRESIÓN**Causas**

1. El H₂ procedente de su unidad de generación viene a baja presión.

2. Fallo del controlador de presión PC-5 situado en el depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión, que provoca el cierre de la válvula PV-6 situada en el conducto de reciclo de H₂ proveniente del depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión.
3. Fallo del controlador de presión PC-6 situado en el depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión, que provoca el cierre de la válvula PV-7 situada en el conducto de reciclo de H₂ proveniente del depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión.
4. Fallo del controlador de presión PC-7 situado en el depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión, que provoca el cierre de la válvula PV-8.

Consecuencias

El compresor sigue trabajando sin llegar a alcanzar el valor previsto para la presión de descarga, por lo que no se abre la válvula de descarga y el gas comprimido no es evacuado. Después de varios ciclos así, como no se recircula el gas, sino que se mantiene dentro del émbolo, se va calentado con lo que desgasta los materiales, se produce dilatación, con posibilidad de gripaje y agrietamiento del cigüeñal. Se producirá fuga únicamente en el interior del compresor con posibles recirculaciones internas.

Salvaguardas

1. No tiene salvaguardas porque esta causa carece de consecuencias sobre el compresor.
2.
 - a. Controlador de presión PC-6 situado en el depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión, que abre la válvula PV-6.
 - b. Alarma de alta temperatura TAH-4 situada a la salida de la 1ª etapa de compresión.
 - c. Existe un SIS (**SIF.2**) que por alta temperatura, TSHH-5 A/B/C (2 de 3), a la salida de la 1ª etapa del compresor detiene el compresor (**SE-2**).
3.
 - a. Controlador de presión PC-7 situado en el depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión, que cierra la válvula PV-7.
 - b. Alarma de alta temperatura TAH-6 situada a la salida de 1ª etapa de compresión.
 - c. Existe un SIS (**SIF.3**) que por alta temperatura, TSHH-7 A/B/C (2 de 3), a la salida de la 2ª etapa del compresor detiene el compresor (**SE-2**).
4.
 - a. Alarma de alta temperatura TAH-8 situado a la salida de 3ª etapa de compresión.
 - b. Existe un SIS (**SIF.4**) que por alta temperatura, TSHH-9 A/B/C (2 de 3), a la salida de la 3ª etapa del compresor detiene el compresor (**SE-2**).

NIVEL

MÁS NIVEL

Causas

1. Cambio de especificación de H₂ de aporte.
2. Fallo del LAL-4 local (en campo) y el operario no drena el C-2.



3. Fallo del LAL-7 local (en campo) y el operario no drena el C-3.
4. Fallo del LAL-10 local (en campo) y el operario no drena el C-4.

Consecuencias

Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de alto nivel LAH-5 en el depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión.
2. Alarma de alto nivel LAH-8 en el depósito de aspiración de la 2ª etapa de compresión.
3. Alarma de alto nivel LAH-11 en el depósito de aspiración de la 3ª etapa de compresión.
4. Existe un SIS (**SIF.5**) que por alto nivel, LSHH-6 A/B/C (2 de 3), situado en el depósito de aspiración de la de la 1ª etapa del compresor detiene el compresor (**SE-3**).
5. Existe un SIS (**SIF.6**) que por alto nivel, LSHH-9 A/B/C (2 de 3), situado en el depósito de aspiración de la de la 2ª etapa del compresor detiene el compresor (**SE-3**).
6. Existe un SIS (**SIF.7**) que por alto nivel, LSHH-12 A/B/C (2 de 3), situado en el depósito de aspiración de la de la 3ª etapa del compresor detiene el compresor (**SE-3**).

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Unidad

A continuación se determinará el nivel de seguridad que tiene cada función instrumentada mencionada con anterioridad en el estudio HAZOP de esta unidad.

Norma 1: Se considera que el turno estará formado dos operarios de campo y otro de panel. Los dos operarios de campo únicamente dan servicio a esta Unidad

Norma 2:

Compresor alternativo (K-1): Se considera que el precio de reposición del compresor alternativo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10^6 Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 6 semanas; mientras que si no es catastrófico no superará los 10^6 Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 2 semanas. En este caso no habrá paro de la producción, ya que siempre se instalan 2 compresores alternativos en paralelo para evitarlo.

Compresor centrífugo (K-2): Se considera que el precio de reposición del compresor centrífugo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10^5 Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 4 semanas; mientras que si no es catastrófico también será mayor de 10^5 Euros y su tiempo de reparación será de



aproximadamente 1 semana. En si que habrá paro de la producción, ya que los compresores si instalan sin compresor de reserva.

Se adjunta un listado de las funciones instrumentadas asociadas a los compresores (alternativo (K-1) y centrífugo (K-2)) de la Unidad analizada. (Ver el P&ID 3 del Anexo 1).

- SIF.1 Protege al compresor K-2 de muy alto nivel en el depósito C-1.
- SIF.2 Protege al compresor K-1 en su 1ª etapa por alta temperatura.
- SIF.3 Protege al compresor K-1 en su 2ª etapa por alta temperatura.
- SIF.4 Protege al compresor K-1 en su 3ª etapa por alta temperatura.
- SIF.5 Protege al compresor K-1 de muy alto nivel en el depósito C-2.
- SIF.6 Protege al compresor K-1 de muy alto nivel en el depósito C-3.
- SIF.7 Protege al compresor K-1 de muy alto nivel en el depósito C-4.

A continuación se analizará cada función instrumentada (SIF) de manera particular.

SIF.1

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF-1
c)	Servicio/equipo	Compresor de reciclo (centrífugo) K-2
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor de reciclo K-2 por muy alto nivel en el depósito KO de aspiración C-1
f)	Elementos sensores	LT-3 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parar compresor de reciclo Cerrar válvula de entrada al depósito C-1
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Arrastre de aminas



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle									
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de arrastre de líquidos al compresor. Si estos líquido vienen de manera constante y en pequeñas cantidades, se producirá una erosión en los alabes y rotura de los cierres de gas. Desequilibrado de cojinetes y fallo en la lubricación. Más adelante comenzará a vibrar, disminuyendo notablemente su rendimiento. Si por el contrario la cantidad de líquido es considerable, el fallo y la rotura se producirán rápidamente, rompiendo toda la parte mecánica e hidráulica del compresor con fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición con posibilidad de fuga al exterior.									
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 20 min									
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes										
	SEGURIDAD PERSONAL										
	W	1	C	2	F	2	P	2	SG	1	
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL										
	W	1	E	1	SG	-					
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS										
W	1	A	2	SG	a						
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alto nivel LAH-1 (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)									
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1									
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1									

SIF.2

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF-2
c)	Servicio/equipo	1ª etapa del compresor alternativo (K-1 A/B)
d)	Enclavamiento asociado	SE-2
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor de daño por muy alta temperatura de la descarga de la 1ª etapa de compresión.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
f)	Elementos sensores	TT-5 A/B/C (2003)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parar compresor
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Entrada de Hidrógeno de aporte a elevada temperatura
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	> 40 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 2 F 2 P 2 SG 2
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 1 SG a
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alta temperatura TAH-1 (1) Alarma de alta temperatura TAH-4 (1) (Como el tiempo de seguridad es mayor de 40 min, se le asigna un crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de varias alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 2 - 1 = 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1



SIF.3

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF-3
c)	Servicio/equipo	2ª etapa del compresor alternativo. (K-1 A/B)
d)	Enclavamiento asociado	SE-2
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor de daño por muy alta temperatura de la descarga de la 2ª etapa de compresión.
f)	Elementos sensores	TT-7 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parar compresor
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo del controlador de temperatura TC-2 situado a la salida del enfriador de la 1ª etapa de compresión que regula su funcionamiento.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	> 1 Hora
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
	W 2 C 2 F 2 P 2 SG 2	C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar a los operarios (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, hay dos operario de planta) sería seria, pudiéndoles provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE. A pesar de tener 2 operarios en planta, consideraremos que sólo puede llegar a sufrir la muerte uno de ellos, ya que la probabilidad de que ambos estén en el escenario de peligro es prácticamente nula
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W 2 E 1 SG a	



Ref	Campo	Detalle
	<div>PROTECCIÓN DE ACTIVOS</div> <div>W2A1SGa</div>	<p>F2: La frecuencia en la que el operario se expone a la zona peligrosa es mayor del 10% de su tiempo de trabajo.</p> <p>P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle.</p> <p>E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.</p> <p>A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo considerando un fallo no catastrófico aproximadamente sería inferior a 10^6 Euros, y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción. Se cataloga como A1.</p>
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	<p>Alarma de alta temperatura TAH-6 (1)</p> <p>(Como el tiempo de seguridad es mayor de 40 min, se le asigna un crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)</p>
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 2 - 1 = 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.4

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF-4
c)	Servicio/equipo	3ª etapa del compresor alternativo. (K-1 A/B)
d)	Enclavamiento asociado	SE-2
e)	Intención del diseño	Proteger al compresor de daño por muy alta temperatura de la descarga de la 3ª etapa de compresión.
f)	Elementos sensores	TT-9 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parar compresor
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo del controlador de temperatura TC-3 situado a la salida del enfriador de la 2ª etapa de compresión que regula su funcionamiento.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Se producirá un desgaste de los materiales del pistón y cilindro, así como de los depósitos anti-pulsatorios. Por ello se reducirá notablemente la vida útil de los componentes. También habrá dilataciones del pistón y cilindro, como no están hechos del mismo material, la dilatación no será del mismo orden por lo que se producirá un gripaje, pudiendo llegar a largo plazo a agrietar el cigüeñal por estas sacudidas e incluso producirse fuga de gas al exterior con



Ref	Campo	Detalle
		posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	> 1 Hora
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
	W 2 C 2 F 2 P 2 SG 2	C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar a los operarios (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, hay dos operario de planta) sería seria, pudiéndoles provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE. A pesar de tener 2 operarios en planta, consideraremos que sólo puede llegar a sufrir la muerte uno de ellos, ya que la probabilidad de que ambos estén en el escenario de peligro es prácticamente nula
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	F2: La frecuencia en la que el operario se expone a la zona peligrosa es mayor del 10% de su tiempo de trabajo.
	W 2 E 1 SG a	P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.
	W 2 A 1 SG a	A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo considerando un fallo no catastrófico aproximadamente sería inferior a 10 ⁶ Euros, y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción. Se cataloga como A1.
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alta temperatura TAH-8 (1) (Como el tiempo de seguridad es mayor de 40 min, se le asigna un crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 2 - 1 = 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.5

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF-5
c)	Servicio/equipo	1ª etapa del compresor alternativo. (K-1 A/B)
d)	Enclavamiento asociado	SE-3
e)	Intención del diseño	Proteger a los compresores K-1 A/B por presencia de líquidos.
f)	Elementos sensores	LT-6 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parar compresor
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Aislamiento de compresores K-1 A/B: Cerrar XV-2 (Succión) Cerrar XV-1 (Descarga)



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle								
a)	Causas	Cambio de especificación de H ₂ de aporte. Fallo del LAL-4 local (en campo) y el operario no drena el C-2.								
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.								
c)	Tiempo de seguridad del proceso	> 40 min								
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes									
	SEGURIDAD PERSONAL									
	W	1 2	C	2 2	F	2 2	P	2 2	SG	1 2
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL									
	W	1 2	E	1 1	SG	- a				
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS									
	W	1 2	A	2 2	SG	a 1				
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alto nivel LAH-5 (1) (Como el tiempo de seguridad es mayor de 40 min, se le asigna un crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)								
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 2 – 1 = 1								
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1								

SIF.6

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
b)	Tag SIF	SIF-6
c)	Servicio/equipo	2ª etapa del compresor alternativo. (K-1 A/B)
d)	Enclavamiento asociado	SE-3
e)	Intención del diseño	Proteger a los compresores K-1 A/B, por presencia de líquidos.
f)	Elementos sensores	LT-9 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parar compresor
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Aislamiento de compresores K-1 A/B: Cerrar XV-2 (Succión) Cerrar XV-1 (Descarga)

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo del LAL-7 local (en campo) y el operario no drena el C-3.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 1 Hora
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 2 F 2 P 2 SG 2
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 2 SG 1
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alto nivel LAH-8 (1) (Como el tiempo de seguridad es mayor de 40 min, se le asigna un crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 3 – 1 = 2
g)	SIL REQUERIDO	SIL 2

SIF.7

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF-7
c)	Servicio/equipo	3ª etapa del compresor alternativo. (K-1 A/B)
d)	Enclavamiento asociado	SE-3
e)	Intención del diseño	Proteger a los compresores K-1 A/B, por presencia de líquidos.
f)	Elementos sensores	LT-12 A/B/C (2oo3)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parar compresor
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Aislamiento de compresores K-1 A/B: Cerrar XV-2 (Succión) Cerrar XV-1 (Descarga)

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo del LAL-10 local (en campo) y el operario no drena el C-4.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Como las válvulas están diseñadas para trabajar con gas, al entrar líquido, se produce un incremento de la pérdida de carga, por lo que no se produce descarga de gas. El vástago comenzará a doblarse por pandeo llegando incluso a romperse. Seguidamente romperán las crucetas, bielas y hasta el cigüeñal. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 1 Hora
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de una alarma y por lo que en operador no drena el depósito C-2, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
	W 2 C 2 F 2 P 2 SG 2	C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar a los operarios (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, hay dos operario de planta) sería seria, pudiéndoles provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE. A pesar de tener 2 operarios en planta, consideraremos que sólo puede llegar a sufrir la muerte uno de ellos, ya que la probabilidad de que ambos estén en el escenario de peligro es prácticamente nula
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W 2 E 1 SG a	



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo						Detalle
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS						<p>F2: La frecuencia en la que el operario se expone a la zona peligrosa es mayor del 10% de su tiempo de trabajo.</p> <p>P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle.</p> <p>E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.</p> <p>A2: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor alternativo aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10⁶ Euros, y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción. Se cataloga como A2.</p>
	W	2	A	2	SG	1	
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados						<p>Alarma de alto nivel LAH-11 (1)</p> <p>(Como el tiempo de seguridad es mayor de 40 min, se le asigna un crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)</p>
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):						SIL 2 – 1 = 1
g)	SIL REQUERIDO						SIL 1

Seguidamente se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el estudio de determinación de SIL de las funciones instrumentadas para esta Unidad.

Enclavamiento	SIF	Descripción de Función Instrumentada de Seguridad (SIF)	SIL	Medición	Acción
SE-1	SIF.1	Protege al compresor K-2 de muy alto nivel en el depósito C-1.	1	LSHH-3 A/B/C	Paro compresor K-2 Cerrar válvula de entrada al deposito C-2
SE-2	SIF.2	Protege al compresor K-1 en su 1ª etapa por alta temperatura.	1	TSHH-5 A/B/C	Paro de compresor K-1 A/B
	SIF.3	Protege al compresor K-1 en su 2ª etapa por alta temperatura.	1	TSHH-7 A/B/C	
	SIF.4	Protege al compresor K-1 en su 3ª etapa por alta temperatura.	1	TSHH-9 A/B/C	
SE-3	SIF.5	Protege al compresor K-1 de muy alto nivel en el depósito C-2.	1	LSHH-6 A/B/C	Paro compresor K-1 A/B Cerrar XV-2 Cerrar XV-1
	SIF.6	Protege al compresor K-1 de muy alto nivel en el depósito C-3.	1	LSHH-9 A/B/C	
	SIF.7	Protege al compresor K-1 de muy alto nivel en el depósito C-4.	1	LSHH-12 A/B/C	

Cabe destacar de esta Unidad, que si únicamente consideramos la norma 1 y valoramos la posibilidad de muerte de ambos operarios, los resultados estarían falseados y obtendríamos nivel SIL muy elevados en comparación con el resto de unidades. Ya que, al considerar W (Frecuencia del evento) como la probabilidad de que se produzca el fallo (en válvula, controlador,...), y no considerar la probabilidad de que en el momento en que



se produzca la fuga se encuentren los 2 operarios justo en el escenario peligroso, se obtendría niveles inaceptables de seguridad.

En este caso se aumenta el nivel SIL para todas las SIF, respecto a unidades anteriormente analizadas, ya que se trata de una unidad más crítica y al tener 2 operarios en planta, el parámetro F2 (exposición frecuente a la zona peligrosa), nos aumenta el nivel SIL. Por ello, se puede destacar que el factor limitante en el cálculo del nivel SIL de cada SIF de esta unidad, es la protección para las personas; ya que el valor SG obtenido es de 2 en todos los escenarios (independientemente de trabajar con gas con alto contenido en líquido). A pesar ello, se alcanza un nivel SIL 1, ya que se dispone de más capas de protección independientes (IPL).

Un SIL1 para una SIF, indica que se debe estudiar la arquitectura propuesta para la función, para comprobar que la probabilidad de fallo bajo demanda es de 0.1 a 0.01. En el cálculo de esta probabilidad, se introducen las pruebas periódicas y de mantenimiento a realizar a cada SIF. Debido a que es un SIL.1, es esperable que las pruebas periódicas coincidan con las paradas de la unidad. Todas estas pruebas deben estar específicamente documentadas para posteriormente ser auditables.



4.2.1.4 Unidad de Gascon de Coquer

Descripción del proceso

Como se dijo anteriormente en el análisis de las principales Unidades del esquema tipo de una refinería, visto en el *Capítulo 2* la Unidad de Gascon de Coquer tiene como objetivo estabilizar las naftas procedentes de la Unidad de Gascon, y obtener butanos y propanos tratados para controlar su acidez y contenido de azufre.

Como puede observarse en el *P&ID 4 del Anexo 1*, los vapores procedentes de la cabeza de la fraccionadora se acumulan en el depósito de aspiración de la 1ª etapa de compresión. Se regula el nivel del depósito por medio de un controlador de nivel que acciona una bomba G-1 encargada de vaciar el depósito y enviarlo a condensarlo o de introducirlo de nuevo a la entrada del recipiente. A continuación el compresor comprime el gas del depósito enviando a un primer sello que se trata de un sistema de acople que previene de que el gas de proceso se escape hacia el medio ambiente.

Si la diferencia de presión entre la entrada y la salida es notable, el compresor comenzará a trabajar en surge o con flujo inverso, por lo que se instala un control anti-surge en la 1ª etapa que envía la descarga de nuevo a la cabeza de la fraccionadora para introducirlo de nuevo a la Unidad, y así disminuir esa diferencia de presión.

La impulsión de la primera etapa de compresión es mezclada con una corriente de agua de stripper y otra de agua de lavado. Seguidamente la mezcla atraviesa un conjunto de 2 condensadores en paralelo, donde se enfría llegando a condensarse parcialmente y se vuelve a juntar en el separador inter-etapa del compresor.

En el separador se dispone de 2 controladores de nivel. Un primer controlador de nivel situado en la bota, regula la salida de agua ácida del separador. El segundo controlador de nivel permite regular la evacuación del líquido inter-etapa, accionando la bomba G-2 y permitiendo la recirculación del líquido, para asegurar un nivel óptimo de trabajo en el separador.

El gas acumulado en el separador inter-etapa es comprimido por el compresor en su 2ª etapa y enviado al sello correspondiente a esta 2ª etapa. La salida del sello es dirigida hacia una debutanizadora y a una depropanizadora para separar convenientemente C₃ y C₄.

Al igual que en la 1ª etapa, también se dispone de un control anti-surge en esta 2ª etapa, encargada de reenviar el gas procedente de la 2ª etapa de compresión a la entrada de intercambiador, y así disminuir la diferencia de presión entre la aspiración y descarga de la 2ª etapa.

Características del compresor

Servicio de compresor de gas de Coquer

Compresor centrífugo lubricado

Operación continua

Número de etapas: 2

Fluido de trabajo: H₂O + H₂S + NH₃ (En las 2 etapas)



Caudal de trabajo:

1ª etapa: 47.635 m³/h

2ª etapa: 44.57 m³/h

Presión de descarga:

1ª etapa: 8.06 Kg/cm²g

2ª etapa: 18.61 Kg/cm²g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada de 7600 KW/h

HAZOP desarrollado de la Unidad

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,...) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,...) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,...). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en el compresor, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

Se divide la Unidad de Gascón de Coquer en 4 nodos. Un primer nodo que comprende la línea de entrada de vapor a la Unidad procedente de la Fraccionadora y el recipiente de aspiración de la 1ª etapa de compresión. Un segundo nodo que comprende la aspiración y descarga de la 1ª etapa de compresión. Un tercer nodo que comprende el separador inter-etapa del compresor y la aspiración de la 2ª etapa. Y un cuarto nodo que comprende la descarga de la 2ª etapa de compresión de gases de coque.

NODO 1: Recipiente de aspiración del compresor C-1.

TEMPERATURA

MÁS TEMPERATURA

Causas

1. Vapores procedentes de la cabeza de fraccionadora a temperatura elevada.

Consecuencias

Si se supera la temperatura de diseño, habrá perturbaciones en la operación del compresor. Primero en caso extremo rozarán los alabes con la parte interior de la carcasa. Por lo que sufrirá vibraciones con rotura del impulsor. No se producirá fuga al exterior ya que por alta temperatura los cierres dobles instalados, soportan las condiciones de trabajo al estar diseñados a una mayor temperatura respecto a la del compresor.

Salvaguardas

1. Alarma de alta vibración en cojinetes.
2. Alarma de temperatura del aceite de lubricación.
3. Alarma de alta temperatura TAH-1 a la salida de la fraccionadora.
4. Alarma de muy alta temperatura TAHH-1 a la salida de la fraccionadora.

MENOS TEMPERATURA

Causas

1. Vapores procedentes de la cabeza de fraccionadora a baja temperatura.

Consecuencias

Posible alto nivel en el recipiente de aspiración de la 1ª etapa de compresión procedente de arrastres de líquidos del acumulador de fraccionadora (Analizado en más nivel). Se producirá una mayor condensación. Sin consecuencias para el compresor siempre y cuando no se trabaje con gas húmedo.

Salvaguardas

1. Instrumentación de nivel asociada al compresor (Más analizado en más nivel).

PRESIÓN**MÁS PRESIÓN****Causas**

1. Fallo del controlador de presión PC-1 y en consecuencia del control de funcionamiento PIC-1.
2. Fallo del controlador de presión PC-2, situado entre la salida del recipiente de aspiración del compresor, que cierra la válvula PV-2.
3. Fallo del controlador de presión PC-3, situado entre la salida del recipiente de aspiración del compresor, que abre la válvula PV-3 permitiendo el libre paso de Fuel Gas a baja presión.
4. Más presión procedente de la fraccionadora
5. Fallo accidental o error humano, y cierre de la válvula motorizada MOV-1 situada a la entrada de la 1ª etapa de compresión.
6. Taponamiento del filtro RS en aspiración del compresor.
7. Paro del compresor K-1.

Consecuencias

Alta presión en el recipiente C-1 de aspiración del compresor y fraccionadora. Baja velocidad del compresor. Aumento de presión en la succión del compresor, aumentará el flujo de gas y el motor es incapaz de presurizar tanto gas. Se producirá una sobrecarga en el motor, llegando posiblemente a la rotura. No se producirá fuga al exterior.

Si la sobrepresión se produce más levemente pero de forma repetitiva, puedo llegar a romper los cierres del compresor. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1.
 - a. Controlador de presión PC-2, que abre la válvula PV-2 que permite la redirección del gas hacia la antorcha.
 - b. Alarma de alta presión PAH-2 a la salida del recipiente de aspiración.
 - c. Alarma de muy alta presión PAHH-2 a la salida del recipiente de aspiración.



- d. Numerosas PSV's de la unidad de fraccionadora.
2.
 - a. Sin consecuencias para la seguridad
3.
 - a. Salvaguardias del caso 1.
4.
 - a. Salvaguardias del caso 3.
5.
 - a. Salvaguardias del caso 1.
 - b. Existe un SIS (**SIF.1**) que por baja presión, PSSLL-4 A/B/C (2 de 3), a la entrada de la 1ª etapa de compresión detiene el compresor de hidrógeno (**SE-1**).
6.
 - a. Sin consecuencias para la seguridad
7.
 - a. Sin consecuencias para el compresor.

MENOS PRESIÓN

Causas

1. Fallo del controlador de presión PC-3 y en consecuencia del control de funcionamiento PIC-1.
2. Fallo del controlador de presión PC-2, situado entre la salida del recipiente de aspiración del compresor, que abre la válvula PV-2.
3. Baja presión aguas arriba
4. Fallo del controlador de nivel LC-2 (Más analizado en nivel).

Consecuencias

Por la baja presión en la entrada, disminuirá mucho la presión a la salida por lo que hay riesgo de que se produzca *surge* o bombeo y existe flujo inverso. Con continuidad de *surge*, habrá fractura en ejes y alabe, así como contacto por rozamiento entre el eje y cojinetes. Rotura de cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de baja presión PAL-3 a la salida del recipiente de aspiración.
2. Controlador de presión PC-3, que abre la válvula PV-3 permitiendo el libre paso de Fuel Gas a baja presión.
3. Existe un SIS (**SIF.1**) que por baja presión, PSSLL-4 A/B/C (2 de 3), a la entrada de la 1ª etapa de compresión detiene el compresor de hidrógeno (**SE-1**).

NIVEL

MÁS NIVEL

Causas

1. Fallo del controlador de alto nivel LC-2 situado en el recipiente de aspiración del compresor, por lo que no arranca la bomba encargada de vaciar dicho depósito.
2. Fallo de la bomba del recipiente de aspiración del compresor.



3. Arrastre de líquidos con caudal superior al de la bomba del recipiente de aspiración del compresor.

Consecuencias

Riesgo de arrastre de líquidos al compresor. Si estos líquidos vienen de manera constante y en pequeñas cantidades, se producirá una erosión en los alabes y rotura de los cierres de gas. Desequilibrado de cojinetes y fallo en la lubricación. Más adelante comenzará a vibrar, disminuyendo notablemente su rendimiento. Si por el contrario la cantidad de líquido es considerable, el fallo y la rotura se producirán rápidamente, rompiendo toda la parte mecánica e hidráulica del compresor con fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición con posibilidad de fuga al exterior.

Salvaguardas

1. Confirmación de marcha de la bomba del recipiente de aspiración.
2. Existe un SIS (**SIF.2**) que por alto nivel, LSHH-3 A/B/C (2 de 3), en el recipiente de aspiración detiene el compresor de hidrógeno (**SE-1**).
3. Alarma de alto nivel LAH-2 en el recipiente de aspiración del compresor.
4. Alarma de muy alto nivel LAHH-2 en el recipiente de aspiración del compresor.

MENOS NIVEL

Causas

1. Fallo del controlador de alto nivel LC-2 y no para la bomba G-1.
2. Se produce un fallo espurio y se abre válvula PV-3, permitiendo la entrada incontrolada de Fuel Gas.
3. Entrada de H₂ o de Vapor de Agua.

Consecuencias

El compresor puede trabajar con Fuel Gas, por lo que no hay consecuencias para su seguridad. Riesgo de cavitación en la bomba G-1, y posible pérdida de contención al cabo de cierto tiempo de funcionar la bomba en vacío. (PROBLEMA ANALIZADO EN BOMBAS).

Salvaguardas

1. Válvula de globo, disco en 8 cerrado que para la entrada de H₂ o de Vapor de Agua a la unidad y activa un enclavamiento que detiene la bomba.

NODO 2: Primera etapa del compresor de gases de coque K-1.

TEMPERATURA

MÁS TEMPERATURA

Causas

1. Vapores procedente del recipiente de aspiración del compresor a elevada temperatura.

2. Cambio de composición del gas de alimentación (Mayor peso molecular del gas o alimentación con vapores ricos en Hidrógeno)

Consecuencias

Si se supera la temperatura de diseño, habrá perturbaciones en la operación del compresor. Primero en caso extremo rozarán los alabes con la parte interior de la carcasa. Por lo que sufrirá vibraciones con rotura del impulsor. No se producirá fuga al exterior ya que por alta temperatura los cierres dobles instalados, soportan las condiciones de trabajo al estar diseñados a una mayor temperatura respecto a la del compresor.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.3**) que por alta temperatura, TSHH-2 A/B/C (2 de 3), a la entrada de la 1ª etapa de compresión detiene el compresor de hidrógeno (**SE-1**).
2. Alarma de alta vibración en cojinetes.
3. Alarma de temperatura del aceite de lubricación.

PRESIÓN**MÁS PRESIÓN****Causas**

1. Fallo accidental o error humano, y cierre de la válvula motorizada MOV-2 situada a la salida de la 1ª etapa de compresión.
2. Fallo espurio y cierre de la válvula de corte XV-1 situada a la salida del sello de la 1ª etapa de compresión.
3. Mayor presión en el recipiente de aspiración de la 1ª etapa de compresión.
4. Fallo del control de funcionamiento PIC-1 que provoca una mayor velocidad del compresor.
5. Mayor caudal de ligeros procedente de la debutanizadora y depropanizadora.

Consecuencias

Incremento de presión en la descarga de la 1ª etapa de compresión. Aumento de presión en la succión del compresor. Daños al compresor, por lo que aumentará el flujo de gas y el motor es incapaz de presurizar tanto gas. Se producirá una sobrecarga en el motor, llegando posiblemente a la rotura.

Si la sobrepresión se produce más levemente pero de forma repetitiva, puede llegar a romper los cierres del compresor. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1.
 - a. Línea diseñada a shut off del compresor (9,5 Kg/cm2g).
2.
 - a. Línea diseñada a shut off del compresor (9,5 Kg/cm2g).
 - b. Controlador de flujo FC-1 que activa en control anti-surge de la 1ª etapa de compresión y abre la válvula FV-1, para disminuir la presión a la descarga del compresor

3.
 - a. Controlador de presión PC-2, que abre la válvula PV-2 que permite la redirección del gas hacia la antorcha.
 - b. Alarma de alta presión PAH-2 a la salida del recipiente de aspiración.
 - c. Alarma de muy alta presión PAHH-2 a la salida del recipiente de aspiración.
4.
 - a. Compresor diseñado a rango máximo del PIC-1, es decir, se diseña la carcasa para que soporte la máxima velocidad de trabajo de motor.
 - b. Relé de protección del motor por sobreintensidad.
 - c. Alarma de alta vibración.
5.
 - a. Similares salvaguardias al caso 3.

MENOS PRESIÓN

Causas

1. Menor presión en el recipiente de aspiración C-1 de la 1ª etapa de compresión.
2. Fallo espurio, produciéndose la apertura de la válvula FV-1.
3. Fallo del motor del compresor K-1.
4. Fallo del control de funcionamiento PIC-1, que provoca una menor velocidad del compresor.

Consecuencias

Por la baja presión en la entrada, disminuirá mucho la presión a la salida por lo que hay riesgo de que se produzca *surge* o bombeo y existe flujo inverso. Con continuidad de *surge*, habrá fractura en ejes y alabe, así como contacto por rozamiento entre el eje y cojinetes. Rotura de cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.1**) que por baja presión, PSLL-4 A/B/C (2 de 3), a la entrada de la 1ª etapa de compresión detiene el compresor de hidrógeno (**SE-1**).
2. Controlador de presión PC-2, que abre la válvula PV-2 que permite la redirección del gas hacia la antorcha.
3. Alarma de alta presión PAH-2 a la salida del recipiente de aspiración a la antorcha.
4. Alarma de muy alta presión PAHH-2 a la salida del recipiente de aspiración a la antorcha.
5. Numerosas PSV's de la unidad de fraccionadora.
6. Confirmación de marcha del motor del compresor.
7. Alarma de alta vibración.

CAUDAL INVERSO

Causas

1. Fallo del motor de compresión K-1 y retroceso de gases.



Consecuencias

Con continuidad de surge, habrá fractura en ejes y alabe, así como contacto por rozamiento entre el eje y cojinetes. Rotura de cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Cierre de la válvula de corte XV-1 situada a la salida del sello de la 1ª etapa de compresión cuando el compresor está parado.

NODO 3: Separador inter-etapa del compresor (C-2).

TEMPERATURA

MÁS TEMPERATURA

Causas

1. Fallo de una celda del condensador inter-etapa del compresor.
2. Fallo eléctrico total del aéreo.
3. Más temperatura procedente de la descarga de la 1ª etapa del compresor.
4. Más temperatura proveniente de los gases de las unidades de:

HIDRODESULFURACIÓN DE NAFTA DE COQUER

DESULFURACIÓN DE GASOIL

5. Fallo del agua de lavado.
6. Fallos de los controladores FC-1 y FC-2, que cierran las válvulas de acceso de agua de stripper y agua de lavado respectivamente a la entrada del condensador inter-etapa de compresión.

Consecuencias

Incremento de presión en la descarga de la 1ª etapa de compresión. Si se supera la temperatura de diseño, habrá perturbaciones en la operación del compresor. Primero en caso extremo rozarán los alabes con la parte interior de la carcasa. Por lo que sufrirá vibraciones con rotura del impulsor. No se producirá fuga al exterior ya que por alta temperatura los cierres dobles instalados, soportan las condiciones de trabajo al estar diseñados a una mayor temperatura respecto a la del compresor.

Salvaguardas

1. Alarma de alta temperatura TAH-3, en la salida de las celdas del condensador inter-etapa del compresor.
2. PSV-1 tarada a 8.78 Kg/cm²g situada a la salida del separador inter-etapa del compresor
3. Confirmación de marcha de los motores del condensador inter-etapa del compresor.
4. Alarma de bajo caudal FAL-1 y FAL-2 de la descarga de condensados.
5. Condensador inter-etapa del compresor (Aéreo)



6. Alarma de temperatura del aceite de lubricación.

MENOS TEMPERATURA

Causas

1. Menor temperatura procedente de la descarga de la 1ª etapa del compresor.
2. Todos los aéreos funcionando en invierno, estando diseñados para enfriar en caso de verano.
3. Fallo de las válvulas FV-1 y FV-2 que abren, y se introduce descontroladamente agua de lavado y agua de stripper.

Consecuencias

Mayor condensación de ligeros. Sin consecuencias para el compresor.

Salvaguardas

1. Carece de salvaguardas para el compresor, ya que no sufre daño alguno por estas causas.

PRESIÓN

MÁS PRESIÓN

Causas

1. Bloqueo a la salida de gases de separador C-2 por fallo y cierre de la válvula motorizada MOV-3.
2. Taponamiento del filtro RS de aspiración de la succión de la 2ª etapa de compresión.
3. Cierre de la válvula automática FV-3 en la línea de descarga de las bombas.

Consecuencias

Aumento de presión en la succión del compresor. Daños al compresor, por lo que aumentará el flujo de gas y el motor es incapaz de presurizar tanto gas. Se producirá una sobrecarga en el motor, llegando posiblemente a la rotura.

Si la sobrepresión se produce más levemente pero de forma repetitiva, puede llegar a romper los cierres del compresor. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. PSV-1 tarada a 8.78 Kg/cm²g situada a la salida del separador inter-etapa del compresor
2. Confirmación de marcha del motor de compresión.
3. Controlador de caudal FC-4 que recircula la salida de la bomba G-2 A/B al separador abriendo la válvula FV-4.

MENOS PRESIÓN



Causas

1. Todos los condensadores inter-etapa del compresor trabajan en invierno, estando diseñados para trabajar en verano.
2. Fallo de las bombas G-2 A/B.
3. Fallo del controlador de caudal FC-4 que recircula la salida de la bomba G-2 A/B al separador abriendo la válvula FV-4. (Menor presión en línea de descarga de bombas).

Consecuencias

Por la baja presión en la entrada, disminuirá mucho la presión a la salida por lo que hay riesgo de que se produzca *surge* o bombeo y existe flujo inverso. Con continuidad de *surge*, habrá fractura en ejes y alabe, así como contacto por rozamiento entre el eje y cojinetes. Rotura de cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Confirmación de marcha del motor del compresor.
2. Alarma de alta vibración.

NIVEL

MÁS NIVEL (DE HIDROCARBURO)

Causas

1. Fallo del controlador de nivel LC-5 situado en el separador inter-etapa que cierra la válvula FV-3 impidiendo la evacuación del líquido inter-etapa.
2. Fallo de las bombas G-2 A/B encargadas de evacuar el separador inter-etapa
3. Fallo espurio y apertura de la válvula de corte FV-4 que se encuentra a la entrada del separador.
4. Cierre imprevisto de la válvula EIV-1 (válvula de aislamiento) por donde se descarga el separador.

Consecuencias

Riesgo de arrastre de líquidos al compresor. Si estos líquidos vienen de manera constante y en pequeñas cantidades, se producirá una erosión en los alabes y rotura de los cierres de gas. Desequilibrado de cojinetes y fallo en la lubricación. Más adelante comenzará a vibrar, disminuyendo notablemente su rendimiento. Si por el contrario la cantidad de líquido es considerable, el fallo y la rotura se producirán rápidamente, rompiendo toda la parte mecánica e hidráulica del compresor con fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.4**) que por alto nivel, LSHH-8 A/B/C (2 de 3), en el separador inter-etapa detiene el compresor de hidrógeno (**SE-1**).
2. Confirmación de marcha de la bomba G-2 A/B.
3. Alarma de bajo caudal FAL-3.



4. Controlador de nivel LC-5 que abre la válvula FV-3.

MENOS NIVEL (DE HIDROCARBURO)

Causas

1. Fallo del controlador de nivel LC-5 situado en el separador inter-etapa que abre la válvula FV-3.

Consecuencias

Riesgo de cavitación en bomba. (PROBLEMA ANALIZADO EN BOMBAS)

Salvaguardas

1. Controlador de nivel FC-4 que abre la válvula FV-4.
2. Bomba G-2 A/B provista de sello doble.
3. Alarma por alta presión entre ambos sellos.

MÁS NIVEL (DE AGUA EN BOTA)

Causas

1. Fallo del controlador de nivel LT-6 situado en la bota del separador inter-etapa del compresor y cierra la válvula LV-7 impidiendo la descarga de agua ácida de la bota.
2. Fallo de las válvulas FV-1 y FV-2, que proporcionan agua de stripper y agua de lavado al condensador.

Consecuencias

Riesgo de arrastre de líquidos al compresor. Si estos líquidos vienen de manera constante y en pequeñas cantidades, se producirá una erosión en los alabes y rotura de los cierres de gas. Desequilibrado de cojinetes y fallo en la lubricación. Más adelante comenzará a vibrar, disminuyendo notablemente su rendimiento. Si por el contrario la cantidad de líquido es considerable, el fallo y la rotura se producirán rápidamente, rompiendo toda la parte mecánica e hidráulica del compresor, con fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Se observa que las consecuencias que provoca la entrada de hidrocarburos y agua al compresor, así como de cualquier líquido, son equivalentes y muy catastróficas.

Salvaguardas

1. El separador dispone bota de agua y de control de nivel.
2. Alarma de alto nivel LAH-7 en la descarga de agua ácida de la bota



NODO 4: Descarga de la segunda etapa del compresor de gases de coque K-1.

TEMPERATURA

MÁS TEMPERATURA

Causas

1. Vapores procedentes del separador inter-etapa del compresor.
2. Mayor peso molecular del gas
3. Alimentación con vapores ricos en Hidrógeno en unidades Hidrodesulfuración de nafta de coquer y Desulfuración de gasoil SR.
4. Fallo del controlador PIC-1 provocando una mayor velocidad del compresor.

Consecuencias

Incremento de presión en la descarga de la 2ª etapa de compresión. Aumento de presión en la succión del compresor. Si se supera la temperatura de diseño, habrá perturbaciones en la operación del compresor. Primero en caso extremo rozarán los alabes con la parte interior de la carcasa. Por lo que sufrirá vibraciones con rotura del impulsor. No se producirá fuga al exterior ya que por alta temperatura los cierres dobles instalados (de nitrógeno), soportan las condiciones de trabajo al estar diseñados a una mayor temperatura respecto a la del compresor.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.5**) que por alta temperatura, TSHH-4 A/B/C (2 de 3), a la salida de la 2ª etapa de compresión detiene el compresor de hidrógeno (**SE-1**).
2. Alarma de alta vibración en cojinetes.
3. Alarma de temperatura del aceite de lubricación.

PRESIÓN

MÁS PRESIÓN

Causas

1. Fallo humano y cierre de la válvula motorizada MOV-4 situada a la salida de la 2ª etapa de compresión, impidiendo la descarga de dicha etapa.
2. Fallo espurio y cierre de la válvula XV-2 situada a la salida del sello de la 2ª etapa de compresión.
3. Más presión en el separador inter-etapa del compresor.
4. Fallo del controlador PIC-1, provocando una mayor velocidad del compresor.
5. Fallo del controlador de presión PC-9 situado aguas debajo de la 2ª etapa de compresión que cierra la válvula PV-9.

Consecuencias

Aumento de presión en la succión del compresor. Daños al compresor, por lo que aumentará el flujo de gas y el motor es incapaz de presurizar tanto gas. Se producirá una sobrecarga en el motor, llegando posiblemente a la rotura.

Si la sobrepresión se produce más levemente pero de forma repetitiva, puede llegar a romper los cierres del compresor. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Línea diseñada al shut off del compresor (19,3 Kg/cm²g).
2. Válvula FV-5 que permite la recirculación de la descarga de la 2ª etapa de compresión hacia el vapor anti-surge de la 2ª etapa.
3. PSV-1 tarada a 8.78 Kg/cm²g situada a la salida del separador inter-etapa del compresor.
4. Alarma de alta presión PAH- 8
5. Compresor diseñado a rango máximo del PIC-1.
6. Relé de protección del motor por sobreintensidad
7. Alarma por alta vibraciones
8. Compresor dispone de un disparo por sobrevelocidad.

MENOS PRESIÓN**Causas**

1. Menos presión en recipiente de aspiración, es decir, en el separador inter-etapa.
2. Fallo abre la válvula FV-5 a la salida de la 2ª etapa de compresión, evitando su paso por el sello.
3. Fallo del motor del compresor.
4. Fallo del controlador proporcionando una menor velocidad al compresor.

Consecuencias

Por la baja presión en la entrada, disminuirá mucho la presión a la salida por lo que hay riesgo de que produzca *surge* o bombeo y existe flujo inverso. Con continuidad de surge, habrá fractura en ejes y alabe, así como contacto por rozamiento entre el eje y cojinetes. Rotura de cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Control anti-surge de 2ª etapa
2. Se instala un controlador de presión a la salida del recipiente de aspiración de la 1ª etapa de compresión PC-2, que abre una válvula PV-2 que permite la redirección del gas hacia la antorcha
3. Alarma de alta presión PAH-2 a la salida del recipiente de aspiración de la 1ª etapa de compresión.
4. Alarma de muy alta presión PAHH-2 a la salida del recipiente de aspiración de la 1ª etapa de compresión.
5. Alarma por alta vibración.
6. Numerosas PSV's de la unidad de fraccionadora.
7. Confirmación de marcha del compresor.

**CAUDAL
INVERSO****Causas**

1. Fallo del motor de compresión y retroceso de gases.



Consecuencias

Con continuidad de surge, habrá fractura en ejes y alabe, así como contacto por rozamiento entre el eje y cojinetes. Rotura de cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Cierre de la válvula de corte XV-2 situada a la salida del sello de la 1ª etapa de compresión cuando el compresor está parado.

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Unidad

A continuación se determinará el nivel de seguridad que tiene cada función instrumentada mencionada con anterioridad en el estudio HAZOP de esta unidad.

Norma 1: Se considera que el turno estará formado por un operario de campo y otro de panel. El operario de campo únicamente da servicio a esta Unidad.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición del compresor centrífugo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10^5 Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 4 semanas; mientras que si no es catastrófico también será mayor de 10^5 Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 1 semana. En si que habrá paro de la producción, ya que los compresores si instalan sin compresor de reserva.

Se adjunta un listado de las funciones instrumentadas asociadas al Compresor K-1 de la Unidad analizada. (Ver el P&ID 4 del Anexo 1)

- | | |
|-------|---|
| SIF.1 | Protege al compresor de baja presión de aspiración. |
| SIF.2 | Protege al compresor de alto nivel en el depósito C-1. |
| SIF.3 | Protege la 1ª etapa de compresión por alta temperatura. |
| SIF.4 | Protege al compresor de alto nivel en el separador inter-etapa C-2. |
| SIF.5 | Protege la 2ª etapa de compresión por alta temperatura. |

A continuación se analizará cada función instrumentada (SIF) de manera particular.

SIF.1

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de Coquer
b)	Tag SIF	SIF-1



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
c)	Servicio/equipo	1º etapa del compresor centrífugo K-1
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Evitar una generación de vacío en la aspiración del compresor K-1.
f)	Elementos sensores	PT-4 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro del compresor K-1
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre válvula anti-retorno 1º etapa, XV-1. Cierre válvula anti-retorno 2º etapa, XV-2. Apertura válvula vapor anti-surge 1ª etapa, FV-1. Apertura válvula vapor anti-surge 2ª etapa, FV-5.

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	1. Cierre inadvertido de la válvula MOV-1. 2. Fallo del controlador de presión PC-3 cuando sea necesario. 3. Fallo del controlador de funcionamiento del compresor PIC-1.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Por la baja presión en la entrada, disminuirá mucho la presión a la salida por lo que hay riesgo de que se produzca <i>surge</i> o bombeo y existe flujo inverso. Con continuidad de surge, habrá fractura en ejes y alabe, así como contacto por rozamiento entre el eje y cojinetes. Rotura de cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min.
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 2 F 1 P 2 SG 1
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 2 SG 1
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de baja presión PAL-3. (0/0/0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
		Control anti surge 1ª etapa (0/1/1) El control anti-surge no da crédito para cierre de la válvula MOV-1, puesto que no evita la consecuencias finales.
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.2

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de Coquer
b)	Tag SIF	SIF-2
c)	Servicio/equipo	1º etapa del compresor centrífugo K-1
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Evitar daños al compresor K-1 por la llegada de líquido al mismo.
f)	Elementos sensores	LT-3A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro del compresor K-1.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre válvula anti-retorno 1º etapa, XV-1. Cierre válvula anti-retorno 2º etapa, XV-2. Apertura válvula vapor anti-surge 1ª etapa, FV-1. Apertura válvula vapor anti-surge 2ª etapa, FV-5.

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	1. Fallo del controlador de alto nivel LC-2 situado en el recipiente de aspiración del compresor, por lo que no arranca la bomba encargada de vaciar dicho depósito. 2. Fallo de la bomba del recipiente de aspiración del compresor. 3. Arrastre de líquidos con caudal superior al de la bomba del recipiente de aspiración del compresor.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de sobrellenado del recipiente y arrastre de líquido a la 2ª etapa del compresor. Riesgo de arrastre de líquidos al compresor. Si estos líquidos vienen de manera constante y en pequeñas cantidades, se producirá una erosión en los alabes y rotura de los cierres de gas. Desequilibrado de cojinetes y fallo en la lubricación. Más adelante comenzará a vibrar, disminuyendo notablemente su rendimiento. Si por el contrario la cantidad de líquido es considerable, el fallo y la rotura se producirán rápidamente, rompiendo toda la parte mecánica e hidráulica del compresor con fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición con posibilidad de fuga al exterior.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 20 min (Causa 1 y 3) > 1 hora (Causa 2)
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	

Ref	Campo	Detalle
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
	W 2 2 1 2 1 3 C 2 F 1 P 2 SG 1 1 2 1 2 a	W3: Según la <i>Tabla 5</i> , para una parada de una bomba, por lo que es un evento esperado varias veces en la vida de la planta, pero no más de una vez al año.
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	W1: El arrastre de líquidos por un caudal superior a de descarga de la bomba es un evento no esperado en la vida de la planta.
	W 2 1 3 E 1 SG a 1 1 -	C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario) sería seria pudiéndole provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	F1: La zona de trabajo no es frecuentada por el operario, pudiendo asegurar que su presencia en la zona peligrosa es menor del 10% del total
	W 2 2 3 A 2 SG 1 1 2 a	P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle. E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas. A2: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor centrífugo aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y además tenemos pérdidas de producción, ya que no se instala compresor de reserva y se supone una semana de reparación de la bomba en la que la unidad está parada. Se cataloga como A2.
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Confirmación de marcha de la bomba del recipiente de aspiración.(0/0/0) Alarma de alto nivel LAH-2.(0/1/0) Alarma de muy alto nivel LAHH-2. (0/1/0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min para la causa 1 y 3, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma) En cambio para el fallo de arranque de la bomba si que se le da un crédito al operador por las 2 alarmas.
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 2 – 1 = 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.3

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de Coquer
b)	Tag SIF	SIF-3
c)	Servicio/equipo	1º etapa del compresor centrífugo K-1
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Evitar daños en los cierres del compresor por muy alta temperatura del



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
		gas de proceso en la descarga de la 1ª etapa.
f)	Elementos sensores	TT-2 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro del compresor K-1.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre válvula anti-retorno 1º etapa, XV-1. Cierre válvula anti-retorno 2º etapa, XV-2. Apertura válvula vapor anti-surge 1ª etapa, FV-1. Apertura válvula vapor anti-surge 2ª etapa, FV-5.

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Más temperatura de los vapores procedente del recipiente de aspiración del compresor. Cambio de composición del gas de alimentación
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Si se supera la temperatura de diseño, habrá perturbaciones en la operación del compresor. Primero en caso extremo rozarán los alabes con la parte interior de la carcasa. Por lo que sufrirá vibraciones con rotura del impulsor. No se producirá fuga al exterior ya que por alta temperatura los cierres dobles instalados, soportan las condiciones de trabajo al estar diseñados a una mayor temperatura respecto a la del compresor.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min.
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 0 F - P - SG -
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 0 SG -
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 2 SG 1
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alta vibración en cojinetes.(0) Alarma de temperatura del aceite de lubricación.(0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1



SIF.4

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de Coquer
b)	Tag SIF	SIF-4
c)	Servicio/equipo	Compresor centrífugo K-1
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Evitar daños al compresor K-1 por la llegada de líquido al mismo.
f)	Elementos sensores	LT-8 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro del compresor K-1.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre válvula anti-retorno 1º etapa, XV-1. Cierre válvula anti-retorno 2º etapa, XV-2. Apertura válvula vapor anti-surge 1ª etapa, FV-1. Apertura válvula vapor anti-surge 2ª etapa, FV-5.

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	1. Fallo del controlador de nivel LC-5 situado en el separador inter-etapa que cierra la válvula FV-3 impidiendo la evacuación del líquido inter-etapa. Fallo espurio y apertura de la válvula de corte FV-4 que se encuentra a la entrada del separador. (Indirecta) Cierre imprevisto de la válvula de aislamiento EIV-1 por donde se descarga el separador. 2. Fallo de las bombas G-2 A/B encargadas de evacuar el separador inter-etapa
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de sobrellenado del recipiente y arrastre de líquido a la 2ª etapa del compresor. Riesgo de arrastre de líquidos al compresor. Si estos líquidos vienen de manera constante y en pequeñas cantidades, se producirá una erosión en los alabes y rotura de los cierres de gas. Desequilibrado de cojinetes y fallo en la lubricación. Más adelante comenzará a vibrar, disminuyendo notablemente su rendimiento. Si por el contrario la cantidad de líquido es considerable, el fallo y la rotura se producirán rápidamente, rompiendo toda la parte mecánica e hidráulica del compresor con fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición con posibilidad de fuga al exterior.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 20 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: El mayor nivel en el depósito vendrá determinado por un fallo en un controlador o en una válvula de corte de la unidad anterior por lo que según la <i>Tabla 5</i> , el evento esperado en la vida de la planta. W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para una parada de una bomba y fallo de la bomba de la de reserva (G-1 A/B), por lo que es un evento esperado en la vida de la planta C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario) sería seria pudiéndole provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE. F1: La zona de trabajo no es frecuentada por el operario, pudiendo asegurar que su presencia en la zona peligrosa es menor del 10% del total P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarlo.
	W 2 C 2 F 1 P 2 SG 1	
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.
	W 2 E 1 SG a	A2: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor centrífugo aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y además tenemos pérdidas de producción, ya que no se instala compresor de reserva y se supone una semana de reparación de la bomba en la que la unidad está parada. Se cataloga como A2.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W 2 A 2 SG 1	
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Confirmación de marcha de la bomba G-2 A/B. (0/0) Controlador de nivel LC-5 que abre la válvula FV-3. (0/0) (Como el controlador es una causa de fallo no se le puede asignar ningún crédito IPL y para la otra causa no nos da crédito ya que tampoco podemos vaciar el depósito C-2.) Alarma de bajo caudal FAL-3. (0/0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.5

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Gascon de Coquer
b)	Tag SIF	SIF-5
c)	Servicio/equipo	Compresor K-1
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Evitar daños en los cierres del compresor por muy alta temperatura del gas de proceso en la descarga de la 2ª etapa.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
f)	Elementos sensores	TT-4 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro del compresor K-1.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre válvula anti-retorno 1º etapa, XV-1. Cierre válvula anti-retorno 2º etapa, XV-2. Apertura válvula vapor anti-surge 1ª etapa, FV-1. Apertura válvula vapor anti-surge 2ª etapa, FV-5.

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Parada o ensuciamiento de los tubos de los aerorrefrigerantes E-1 A/B
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Si se supera la temperatura de diseño, habrá perturbaciones en la operación del compresor. Primero en caso extremo rozarán los alabes con la parte interior de la carcasa. Por lo que sufrirá vibraciones con rotura del impulsor. No se producirá fuga al exterior ya que por alta temperatura los cierres dobles instalados, soportan las condiciones de trabajo al estar diseñados a una mayor temperatura respecto a la del compresor.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min.
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 0 F - P - SG -
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 0 SG -
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 2 SG 1
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de lata temperatura TAH-3 (0) Alarma de alta vibración en cojinetes. (0) Control de temperatura del aceite de lubricación.(0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

Seguidamente se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el estudio de determinación de SIL de las funciones instrumentadas para esta Unidad.



Enclavamiento	SIF	Descripción de Función Instrumentada de Seguridad (SIF)	SIL	Medición	Acción
SE-1	SIF.1	Proteger al compresor de baja presión de aspiración.	1	PSLL-4 A/B/C	Paro compresor K-1 Cierre XV-1 Cierre XV-2 Abre FV-1 Abre FV-5
	SIF.2	Proteger al compresor de alto nivel en el depósito C-1.	1	LSHH-3 A/B/C	
	SIF.3	Proteger la 1ª etapa de compresión por alta temperatura.	1	TSHH-2 A/B/C	
	SIF.4	Proteger al compresor de alto nivel en el separador inter-etapa C-2.	1	LSHH-8 A/B/C	
	SIF.5	Proteger la 2ª etapa de compresión por alta temperatura.	1	TSHH-4 A/B/C	

En este estudio podemos deducir que el factor limitante en el nivel SIL de cada una de las funciones instrumentadas analizadas, asociadas al compresor centrífugo de la Unidad de Gascón de Coquer, es principalmente la protección de activos. Es decir, según se analizó en la norma 2 de esta unidad, el coste de reposición del compresor, sumados a los costes por pérdidas de producción, ya que carece de un compresor en paralelo, y al tratarse de una unidad crítica los costes serían cuantiosos, pudiendo considerar un parámetro de riesgos A2.

También cabe destacar en este estudio que no se observa esa diferencia en cuanto a nivel de SIL, entre los fallos derivados por tratar con presencia de líquidos en el gas de trabajo y el resto de fallos, ya que en los compresores alternativos esta causa provoca un inminente fallo catastrófico, mientras que los centrífugos transigen mejor esta causa.

Un SIL1 para una SIF, como es el obtenido en todas las SIF de esta unidad, indica que se debe estudiar la arquitectura propuesta para la función, para comprobar que la probabilidad de fallo bajo demanda es de 0.1 a 0.01. En el cálculo de esta probabilidad, se introducen las pruebas periódicas y de mantenimiento a realizar a cada SIF. Debido a que es un SIL.1, es esperable que las pruebas periódicas coincidan con las paradas de la unidad. Todas estas pruebas deben estar específicamente documentadas para posteriormente ser auditables.



4.2.1.5 Unidad de Recuperación de gases de Antorcha Dulce.

Descripción del proceso

Como se dijo anteriormente en el análisis de las principales Unidades del esquema tipo de una refinería, visto en el *Capítulo 2*, la Unidad de Recuperación de gases de Antorcha Dulce tiene como objetivo, como su propio nombre indica, recuperar los gases de antorcha procedentes de diversas unidades de proceso y mediante un tratamiento de absorción, utilizando amina con disolvente, reutilizar estos gases como fuel gas a baja presión.

Como puede observarse en el *P&ID 5 del Anexo 1*, se introduce a la Unidad fuel gas a baja presión y los gases procedentes del colector de antorcha, y se acumulan en el depósito C-1. Desde el depósito los gases son mezclados con la recirculación proveniente del separador trifásico y con una corriente de nitrógeno (sólo utilizada para el arranque del compresor); y juntos son aspirados por cuatro compresores de anillo líquido K-1 A/B/C/D dispuestos en paralelo, que funcionan de forma intermitente, donde entran en contacto con una corriente de agua que constituye el anillo líquido. En este tipo de compresor, el proceso de compresión y enfriamiento se realiza simultáneamente.

A continuación la descarga de los compresores, es decir líquido y gas saturado, pasa por un separador trifásico, donde se efectúa la separación de gas, del líquido pesado (agua) y del líquido ligero (condensado de hidrocarburos pesados). Por un lado el gas que sale del separador alimenta directamente la torre absorbidora de aminas, de donde se obtiene el fuel gas que se requería, a partir de un controlador de presión. Parte de la descarga de la torre se recircula y es aspirado de nuevo por los compresores.

Por otro lado, el HC obtenido en el separador trifásico, se envía a slops, que son depósitos de almacenamiento de HC de descarga de las diferentes unidades, para reutilizarlo de nuevo junto al crudo o en procesos preferentemente catalíticos.

Por ultimo, parte del agua obtenida en el separador es enviado a drenaje, otra parte a stripping, donde se absorben sales, sulfhídrico y amoníaco; y el resto se introduce de nuevo en los compresores para formar el anillo líquido.

También se introduce agua procedente de stripping a la Unidad, la cual mezclada con condensado a baja presión, es la encargada de mantener el sello, lubricar y refrigerar los 4 compresores de anillo líquido externamente.

Características del compresor

Servicio de compresor de gases de antorcha

Compresor de anillo líquido

Operación continua

Número de etapas: 1 (4 en paralelo)

Fluido de trabajo: Fuel gas+ HC + N₂

Caudal de trabajo: 1540 m³/h

Presión de descarga: 7 Kg/cm²g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada de 1540 KW/h.



HAZOP desarrollado de la Unidad

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,...) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,...) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en el compresor, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

Se divida la Unidad de Recuperación de Gases de Antorcha en dos nodos. Un primer nodo que comprende la línea de entrada de Fuel-Gas a la Unidad y el depósito C-1. Y un segundo nodo que comprende los compresores de anillo líquido K-1 A/B/C/D, el separador trifásico C-2 y el intercambiador de calor E-1.

NODO 1: Depósito C-1 y equipos asociados

PRESIÓN

MENOS PRESIÓN (En depósito C-1)

Causas

1. Fallo del controlador de presión situado a la salida del depósito C-1, PC-1, que cierre la válvula de entrada de alimentación de Fuel Gas a baja presión PV-1 a dicho depósito.

Consecuencias

Riesgo de vacío en el colector de antorcha. Riesgo de entrada de aire y formación de atmósfera inflamable. Aumento de vibraciones por trabajo en condiciones de "vacío". Posible rotura de cojinetes y de cierres sin fuga al exterior.

Salvaguardas

1. Alarma de baja presión PAL-2, situada en la tubería común de entrada a los 4 compresores en paralelos, procedente del depósito de C-1.

NODO 2: Compresores de anillo líquido K-1 A/B/C/D, separador trifásico C-2, e intercambiador de calor (enfriador) E-1.

NIVEL

MÁS NIVEL (De agua en separador o de agua en el anillo del compresor)

Causas

1. Fallo del controlador de nivel situado en separador trifásico LC-1 que cierre la válvula de salida de agua LV-1, dirigido a stripping.
2. Fallo espurio y cierre de la válvula de corte XV-1, situada en la descarga de agua a stripping.



Consecuencias

Subida gradual del nivel de agua en el separador. Subida de nivel por vasos comunicantes en el anillo líquido del compresor. Bajada del caudal de gases. Imposibilidad de recuperar los gases del colector de antorcha.

Debido a que los 4 compresores trabajan de forma discontinua según la demanda de la Unidad de Coquer, se tiene que analizar 2 casos:

- Si el compresor se encuentra parado y se le demanda su arranque, se producirá una sobrecarga del motor, y si falla su protección térmica, puede llegar incluso a la rotura. Los cojinetes pueden sufrir algún daño por el golpe que deben soportar cada vez que el motor intenta arrancar. No se producirá fuga al exterior.
- Si el compresor se encuentra en movimiento, siempre y cuando no haya problemas en la evacuación de la carga, el compresor no sufre ningún daño.

Salvaguardas

1. Existen unos SISs (**SIF.1/2/3/4**) que por alto nivel, LSHH-11-21-31-41, situados en cada uno de los 4 compresores de anillo líquido, detienen su compresor respectivo (**SE-1/ SE-2/ SE-3/ SE-4**).
2. Alarma de alto nivel, LAHH-2, situada en el controlador de nivel LI-2 A/B/C, del depósito separador trifásico.

MENOS NIVEL (De agua en separador)

Causas

1. Fallo del controlador de nivel situado en separador trifásico LC-1 que abre la válvula de salida de agua LV-1, dirigido a stripping.

Consecuencias

Bajada gradual del nivel de agua en el separador. Bajada de nivel por vasos comunicantes en el anillo líquido del compresor, que operaría sin líquido. Incremento gradual de la temperatura en el compresor por falta de agua de refrigeración. Romperá primero el impulsor. Se producirán vibraciones por el rozamiento y sufrirán daños los cojinetes y los cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.5**) que por bajo nivel, LSLL-2 A/B/C, situados en el separador trifásico que detiene los 4 compresores (**SE-5**).
2. Alarma de bajo nivel, LALL-2, situada en el controlador de nivel LI-2 A/B/C, del depósito separador trifásico.

CAUDAL

NO CAUDAL (de spill back a través PV-3)



Causas

1. Fallo del controlador de presión PC-3, situado a la entrada común de los compresores, que abre la válvula PV-3 A/B del reciclo de alimentación procedente del separador trifásico.

Consecuencias

Riesgo de vacío en el colector de antorcha. Riesgo de entrada de aire y formación de atmósfera inflamable. Aumento de vibraciones por trabajo en condiciones de "vacío". Posible rotura de cojinetes y de cierres sin fuga al exterior.

Salvaguardas

1. Controlador de presión PC-1 situado a la salida del depósito C-1 que abre PV-1 de entrada de Fuel Gas al depósito. Sólo válido para un compresor y medio.
2. Alarma de baja presión PAL-2 situada a la entrada común de los 4 compresores de anillo líquido.

NO CAUDAL (a través del compresor)

Causas

1. Fallo espurio y cierre de alguna de las válvulas XV-10/20/30/40 de los 4 compresores respectivamente, situadas a la salida de alimentación de los anillos líquidos, y que envía posteriormente su salida al separador trifásico.
2. Obstrucción del filtro en aspiración situado anteriormente a cada compresor.

Consecuencias

Riesgo de aumento de presión en la impulsión del compresor por encima de valores de diseño (7 Kg/cm²g). Riesgo de sobrecalentamiento del motor y rotura del mismo. Sin fuga de producto al exterior.

Salvaguardas

1. PSV-1/2/3/4 taradas a 8 Kg/cm²g situadas en cada una de las salidas de los 4 compresores respectivamente, que envía el producto al separador trifásico.
2. Alarmas de alta presión situadas a la salida de alimentación de cada uno de los 4 compresores PAH-13/23/33/43.

NO CAUDAL (en alimentación a anillo líquido)

Causas

1. Fallo espurio y cierre de alguna de las válvulas de alimentación a algún compresor anillo líquido XV-11/21/31/41, procedente del separador trifásico a través del intercambiador.

Consecuencias

Bajada gradual del nivel de agua en el separador. Bajada de nivel por vasos comunicantes en el anillo líquido del compresor, que operaría sin líquido. Riesgo de alta temperatura en el compresor por falta de agua de refrigeración. Se trata de un daño catastrófico, rompiendo primero el impulsor. Se producirán vibraciones por el rozamiento y sufrirán daños los cojinetes y los cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Existen unos SISs (**SIF. 11/12/13/14**) que por bajo caudal, FSLL-10-20-30-40 A/B/C, situados a la entrada de cada uno de los 4 compresores de anillo líquido, detienen su compresor respectivo (**SE-1/ SE-2/ SE-3/ SE-4**).

NO CAUDAL (de agua de make up hacia cierres)**Causas**

1. Fallo espurio y cierre de alguna válvula de corte XV-12/22/32/42 situadas a la entrada de cada uno de los compresores, procedente de la entrada de agua de stripping (make up).
2. Obstrucción del filtro

Consecuencias

Falta de líquido de cierre, por lo que carece de refrigeración en el mismo. Se producirá un aumento acelerado de la temperatura en el cierre provocando su rotura. Esto desencadenará un grave problema, ya que se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarmas de bajo flujo FAL- 11/21/31/41 situadas en la entrada de agua stripping a cada compresor.
2. Alarmas de bajo presión PAL- 10/20/30/40, situadas a la salida de cada uno de los 4 compresores.
3. Alarma de alta presión diferencial, PDSHH-1, situada a la entrada de make up.
4. Existen unos SISs (**SIF.6/7/8/9**) que por baja presión, PSLL-11/21/31/41 A/B/C, accionados por un sensor de flujo a la salida del sello de cada compresor, detienen su compresor respectivo (**SE-1/ SE-2/ SE-3/ SE-4**).

NO CAUDAL (hacia la Torre de absorción de aminas)**Causas**

1. Fallo del controlador de presión PC-4, situado a la salida de la torre de absorción de aminas que cierra la válvula PV-4, impidiendo la recirculación del producto como fuel gas de producción.



Consecuencias

Presurización del separador trifásico y de la columna absorbadora de aminas hasta valores que pueden superar los de diseño. Posibles fugas de gas al exterior con SH₂ por puntos débiles con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de alta presión PAH-5, situada a la salida del separador trifásico dirigido a la torre de absorción de amina.
2. Existe un SIS (**SIF.10**) que por alta presión, PSHH-6 A/B/C, situado en la salida del separador tri-fase detiene los 4 compresores (**SE-5**).
3. PSV-1/2/3/4 taradas a 8 Kg/cm²g situadas en cada una de las salidas de los 4 compresores respectivamente, que envía el producto al separador trifásico.

MÁS CAUDAL (de spill back a través PV-3)

Causas

1. Fallo del controlador de presión PC-3, situado a la entrada común de los compresores, que abre la válvula PV-3 A/B del reciclo de alimentación procedente del separador trifásico.

Consecuencias

Recirculación del gas de antorcha en circuito cerrado a través de los compresores. Aumento de presión en colector de antorcha y envío de gases a antorcha. Se producirá un sobrecalentamiento del motor por una mayor potencia absorbida. Sin consecuencias para el compresor.

Salvaguardas

1. Alarma de alta presión PAH-2, situada en la entrada común a los compresores.

PRESIÓN

MENOS PRESIÓN (En el circuito de Make up)

Causas

1. Obstrucción del filtro en línea de agua de make up
2. Rotura de uno de los cierres de anillo líquido

Consecuencias

Cese de aporte de líquido a los cierres, por lo que carece de refrigeración en los mismos. Se producirá un aumento acelerado de la temperatura en el cierre provocando su rotura. Esto desencadenará un grave problema, ya que se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de de alta presión diferencial, PDSHH-1, situada a la entrada de make up.
2. Existen unos SISs (**SIF.17/18/19/20**) que por baja flujo, FSL-11/21/31/41, situados a la entrada de make up a cada uno de los 4 compresores detienen su compresor respectivo (**SE-1/ SE-2/ SE-3/ SE-4**).
3. Alarmas de baja presión PAL- 10/20/30/40 situadas a la salida de cada uno de los 4 compresores.
4. Existen unos SISs (**SIF.6/7/8/9**) que por baja presión, PSLL-11/21/31/41 A/B/C, accionados por un sensor de flujo a la salida del sello de cada compresor, detienen su compresor respectivo (**SE-1/ SE-2/ SE-3/ SE-4**).

MENOS PRESIÓN (en el circuito de agua del anillo)**Causas**

1. Obstrucción del filtro en la línea de agua de anillo líquido

Consecuencias

Riesgo de operar sin líquido del anillo líquido del compresor. Incremento gradual de la temperatura en el compresor por falta de agua de refrigeración. Se trata de un daño catastrófico, rompiendo primero el impulsor. Se producirán vibraciones por el rozamiento y sufrirán daños los cojinetes y los cierres. Se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de muy alta presión diferencial PSDHH-2 situada después del intercambiador a la salida del separador trifásico.
2. Existen unos SISs (**SIF.11/12/13/14**) que por baja flujo, FSLL-10-20-30-40 A/B/C, situados a la entrada a lo compresores de anillo líquido detienen su compresor respectivo (**SE-1/SE-2/SE-3/SE-4**).

TEMPERATURA**MÁS TEMPERATURA (en la aspiración de los compresores)****Causas**

1. Descarga caliente en el colector de antorcha.

Consecuencias

Riesgo de superar la temperatura de diseño (100°C) del compresor de anillo líquido. Si trabajo mucho tiempo en estas condiciones puede provocar un daño catastrófico e irreparable total del compresor. Primero se producirían dilataciones térmicas, comenzando el roce y las vibraciones. Rompiéndose el impulsor, la carcasa y los cojinetes. Se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de alta temperatura TI-1, situada en la entrada común a los compresores.
2. Existe un SIS (**SIF.15**) que por alta temperatura, TSHH-2 A/B/C, situado en la entrada común a los compresores detiene los 4 compresores (**SE-5**).

MÁS TEMPERATURA (en el circuito de agua de anillo líquido)**Causas**

1. Fallo de agua de refrigeración en el cambiador E-1.
2. Ensuciamiento del cambiador E-1

Consecuencias

Riesgo de generar daños en el compresor de anillo líquido por superar la temperatura de diseño (100°C). La velocidad de anillo se vería reducida notablemente. Se producirían un importante daño en el impulsor, llegando a romper con cierta facilidad. Esto originará rozamiento, vibraciones y gripaje. Se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de alta temperatura TI-3, situada a la salida del intercambiador E-1.
2. Existe un SIS (**SIF.16**) que por alta temperatura, TSHH-4 A/B/C, situado a la salida del intercambiador E-1 detiene los 4 compresores (**SE-5**).

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Unidad

A continuación se determinará el nivel de seguridad que tiene cada función instrumentada mencionada con anterioridad en el estudio HAZOP de esta unidad.

Norma 1: Se considera que el turno estará formado por un operario de campo y otro de panel. El operario de campo da servicio a dos unidades gemelas por lo que se considera de forma conservadora que la presencia en planta es de un operario.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición del compresor de anillo líquido de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10⁵ Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 1 semanas; mientras que si no es catastrófico también será mayor de 10⁵ Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 3 días. En este caso si que habrá pérdida de la producción, ya que aunque se disponga de 4 compresores trabajando en paralelo, lo hacen de forma intermitente. El ciclo de trabajo es de 18 horas y durante 4 horas del ciclo los 4 compresores trabajan a la vez, por lo que se estará enviando Fuel Gas a la antorcha durante los días de reparación del compresor dañado.

Se adjunta un listado de las funciones instrumentadas asociadas a los compresores de anillo líquido de la Unidad analizada. (Ver el P&ID 5 del Anexo 1)

SIF.1/2/3/4 Protege a cada compresor de alto nivel de agua en el anillo.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

- SIF.5 Protege a los 4 compresores de bajo nivel en el separador C-2.
- SIF.6/7/8/9 Protege a cada compresor de baja presión en el sello.
- SIF.10 Protege a los 4 compresores de alta presión en el colector de descarga.
- SIF.11/12/13/14 Protege a cada compresor de bajo caudal de agua en el anillo.
- SIF.15 Protege a los 4 compresores de alta temperatura en la entrada común.
- SIF.16 Protege a los 4 compresores de alta temperatura de agua al anillo.
- SIF.17/18/19/20 Protege a cada compresor de bajo caudal de agua make up.

A continuación se analizará cada función instrumentada (SIF) de manera particular.

SIF.1/2/3/4

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Recuperación de gases de antorcha
b)	Tag SIF	SIF.1, SIF.2, SIF.3, SIF.4
c)	Servicio/equipo	Compresor anillo líquido K-1 A/B/C/D
d)	Enclavamiento asociado	LSHH-11 SE-1 LSHH-21 SE-2 LSHH-31 SE-3 LSHH-41 SE-4
e)	Intención del diseño	Proteger a los compresores de anillo líquido del daño mecánico por elevada presencia de líquidos.
f)	Elementos sensores	LT-11,LT-21,LT-31,LT-41 (Todos 1001)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Cada enclavamiento para su compresor correspondiente.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo del controlador de nivel situado en separador trifásico LC-1 que cierre la válvula de salida de agua LV-1, dirigido a stripping. Fallo espurio y cierre de la válvula de corte XV-1, situado en la descarga de agua a stripping.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Subida gradual del nivel de agua en el separador. Subida de nivel por vasos comunicantes en el anillo líquido del compresor. Bajada del caudal de gases. Imposibilidad de recuperar los gases del colector de



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle								
		antorcha. Debido a que los 4 compresores trabajan de forma discontinua según la demanda de la Unidad de Coquer, se tiene que analizar 2 casos: ➤ Si el compresor se encuentra parado y con un elevado nivel de agua en su interior y se le demanda su arranque. Se producirá una sobrecarga del motor, y si falla su protección térmica, puede llegar incluso a la rotura. Los cojinetes pueden sufrir algún daño por el golpe que deben soportar cada vez que el motor intenta arrancar. No se producirá fuga al exterior. ➤ Si el compresor se encuentra en movimiento, siempre y cuando no haya problemas en la evacuación de la carga, el compresor no sufre ningún daño.								
c)	Tiempo de seguridad del proceso	<15 min (para el caso de estar parado y demandar su arranque)								
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes									
	SEGURIDAD PERSONAL									
	W	2	C	0	F	-	P	-	SG	-
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL									
	W	2	E	1	SG	a				
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS									
	W	2	A	1	SG	a				
	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo espurio de una válvula de corte o un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta. C0: Al no haber fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario es nula o muy leve, sin requerimiento de baja médica. E0: Incidente sin fugas al exterior. Sin consecuencias medioambientales. E1: Emisión puntual a antorcha por el gas no recuperado, por el fallo de únicamente de un compresor dañado. Tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas. A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor de anillo líquido aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y además tenemos pérdidas de producción de 3 días del compresor averiado. Se cataloga como A1.									
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	-								
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a								
g)	SIL REQUERIDO	SIL a								

SIF.5

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Recuperación de gases de antorcha
b)	Tag SIF	SIF.2
c)	Servicio/equipo	Compresor anillo líquido K-1 A/B/C/D
d)	Enclavamiento asociado	SE-5
e)	Intención del diseño	Proteger a los compresores de anillo líquido de trabajar sin líquido
f)	Elementos sensores	LT-2 (2003)
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Detener los 4 compresores a la vez.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	<p>Cierre XV-10/20/30/40 en línea impulsión</p> <p>Cierre XV-11/21/31/41 en línea líquido al anillo</p>



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
		Cierre XV-12/22/32/42 en línea de agua make-up al sello Abre PV-3 A/B

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo LC-1 con apertura de la LV-1
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Bajada gradual del nivel de agua en el separador. Bajada de nivel por vasos comunicantes en el anillo líquido del compresor, que operaría sin líquido. Incremento gradual de la temperatura en el compresor por falta de agua de refrigeración. Romperá primero el impulsor. Se producirán vibraciones por el rozamiento y sufrirán daños los cojinetes y los cierres. Se producirán fugas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 15min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
e)	SEGURIDAD PERSONAL	
f)	W 2 C 2 F 1 P 2 SG 1	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta. C2: Como consecuencias a una fuga de H ₂ , la tendencia de esta sustancia sería elevarse y dispersarse rápidamente. No obstante si encontrase un punto de ignición se produciría un incendio tipo Jet FIRE que podría afectar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario).
g)	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
h)	W 2 E 1 SG a	F1: La zona de trabajo no es frecuentada por el operario, pudiendo asegurar que su presencia en la zona peligrosa es menor del 10% del total P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarlo. E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.
i)	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
j)	W 2 A 1 SG a	A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor de anillo líquido aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y además tenemos pérdidas de producción de 3 días del compresor averiado. Se cataloga como A1.
k)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	-
l)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
m)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.6/7/8/9

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Recuperación de gases de antorcha
b)	Tag SIF	SIF.6, SIF.7, SIF.8, SIF.9
c)	Servicio/equipo	Compresor anillo líquido K-1 A/B/C/D



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
d)	Enclavamiento asociado	PSLL-11 A/B/C SE-1 PSLL-21 A/B/C SE-2 PSLL-31 A/B/C SE-3 PSLL-41 A/B/C SE-4
e)	Intención del diseño	Evitar bajo presión en el sello del compresor K-1 A Evitar bajo presión en el sello del compresor K-1 B Evitar bajo presión en el sello del compresor K-1 C Evitar bajo presión en el sello del compresor K-1 D
f)	Elementos sensores	PT-11 A/B/C PT-21 A/B/C PT-31 A/B/C PT-41 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro del compresor K-1 A Paro del compresor K-1 B Paro del compresor K-1 C Paro del compresor K-1 D
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre XV-10/20/30/40 en línea impulsión Cierre XV-11/21/31/41 en línea líquido al anillo Cierre XV-12/22/32/42 en línea de agua make-up al sello y si el resto de compresores K-1 están parados: Abre PV-3 A/B

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle								
a)	Causas	1. Fallo espurio y cierre las válvulas de corte XV-12/22/32/42 situadas a la entrada de cada uno de los compresores, procedente de la entrada de agua de stripping (make up). Obstrucción o rotura del sello. 2. Obstrucción del filtro								
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Falta de líquido de cierre, por lo que carece de refrigeración en el mismo. Se producirá un aumenta acelerado de la temperatura en el cierre provocando su rotura. Esto desencadenará un grave problema, ya que se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.								
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 5 min > 1 hora (Causa de obstrucción del filtro)								
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes									
SEGURIDAD PERSONAL		W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo espurio de una válvula de corte, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.								
W	2 1	C	2 2	F	1 1	P	2 2	SG	1 a	W1: No es probable que se obstruya el filtro ya que se instala uno de reserva.
PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL		C2: Como consecuencias a una fuga de H ₂ , la tendencia de esta sustancia sería elevarse y dispersarse rápidamente. No obstante si encontrase un punto de ignición se produciría un incendio tipo Jet FIRE que podría afectar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario).								
W	2 1	E		1 1	SG		a -			F1: La zona de trabaja no es frecuentada por el operario, pudiendo asegurar que su presencia en la zona peligrosa es menor del 10% del



Ref	Campo	Detalle
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	total. P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle. E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas. A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor de anillo líquido aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10^5 Euros y además tenemos pérdidas de producción de 3 días del compresor averiado. Se cataloga como A1.
	W 2 1 A 1 1 SG a -	
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	PT-10/20/30/40 con alarma de alta presión (0/1) Alarma de de alta presión diferencial, PDSHH- (0/1) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma) (Para la segunda causa si que se le debe dar un crédito a los operaos por las alarmas, pero como no es el caso limitante, no afecta al nivel SIL)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.10

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Recuperación de gases de antorcha
b)	Tag SIF	SIF.10
c)	Servicio/equipo	Compresor anillo líquido K-1 A/B/C/D
d)	Enclavamiento asociado	PSHH-6 A/B/C SE-5
e)	Intención del diseño	Evitar alta presión en colector descarga de los compresores K-1 A/B/C/D
f)	Elementos sensores	PT-6 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro de los cuatro compresores K-1 A/B/C/D
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre XV-10/20/30/40 en línea impulsión Cierre XV-11/21/31/41 en línea líquido al anillo Cierre XV-12/22/32/42 en línea de agua make-up al sello Abre PV-3 A/B

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo PC-4 con cierre de PV-4 en cabeza de torre absorbadora de aminas.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Presurización del separador trifásico y de la columna absorbidora de aminas hasta valores que pueden superar los de diseño. Posibles fugas de gas al exterior con SH ₂ por puntos débiles con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 10 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta. C2: Como consecuencias de una fuga de H ₂ , la tendencia de esta sustancia sería elevarse y dispersarse rápidamente. No obstante si encontrase un punto de ignición se produciría un incendio tipo Jet FIRE que podría afectar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario). F1: La zona de trabajo no es frecuentada por el operario, pudiendo asegurar que su presencia en la zona peligrosa es menor del 10% del total P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle.
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor de anillo líquido aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y además tenemos pérdidas de producción de 3 días del compresor averiado. Se cataloga como A1.
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Disparo las cuatro PSV-1/2/3/4 de los cuatro compresores taradas a 8.5 Kg/cm ² g. (Como se trata de un compresor y por tanto trabaja con un gas, se identifica como producto limpio y además, como las PSVs no están diseñadas para el caso de Runaway (Sólo en caso de reactores), (2)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1 – 2 = –
g)	SIL REQUERIDO	SIL -

SIF.11/12/13/14

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Recuperación de gases de antorcha
b)	Tag SIF	SIF.11, SIF.12, SIF.13, SIF.14
c)	Servicio/equipo	Compresor anillo líquido K-1 A/B/C/D
d)	Enclavamiento asociado	FSL 10 A/B/C SE-1 FSL 20 A/B/C SE-2 FSL 30 A/B/C SE-3 FSL 40 A/B/C SE-4
e)	Intención del diseño	Evitar bajo caudal de agua en el anillo del compresor K-1A Evitar bajo caudal de agua en el anillo del compresor K-1B Evitar bajo caudal de agua en el anillo del compresor K-1C



Ref	Campo	Detalle
		Evitar bajo caudal de agua en el anillo del compresor K-1D
f)	Elementos sensores	FT-10 A/B/C FT-20 A/B/C FT-30 A/B/C FT-40 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro del compresor K-1 A Paro del compresor K-1 B Paro del compresor K-1 C Paro del compresor K-1 D
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre XV-10/20/30/40 en línea impulsión Cierre XV-11/21/31/41 en línea líquido al anillo Cierre XV-12/22/32/42 en línea de agua make-up al sello y si el resto de compresores K-1 están parados: Abre PV-3 A/B

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle									
a)	Causas	Fallo espurio y cierre de alguna de las válvulas de alimentación al algún compresor anillo líquido XV-11/21/31/41, procedente del separador trifásico a través del intercambiador Obstrucción filtros a la salida del E-1									
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de operar sin líquido del anillo líquido del compresor. Incremento gradual de la temperatura en el compresor por falta de agua de refrigeración. Se trata de un daño catastrófico, rompiendo primero el impulsor. Se producirán vibraciones por el rozamiento y sufrirán daños los cojinetes y los cierres. Se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.									
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 10 min									
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes										
	SEGURIDAD PERSONAL										
	W	2	C	2	F	1	P	2	SG	1	
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL		W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo espurio de una válvula de corte, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta. C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario) sería seria pudiéndole provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE. F1: La zona de trabaja no es frecuentada por el operario, pudiendo asegurar que su presencia en la zona peligrosa es menor del 10% del total P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle. E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas. A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor de anillo líquido aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y además tenemos pérdidas de producción de 1 semana del compresor averiado. Se cataloga como A1.								
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS										
	W	2	A	1	SG	a					
e)	Salvaguardias y créditos IPL	PT-10/20/30/40 con alarma de alta presión (0)									



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
	asociados	(Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.15

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Recuperación de gases de antorcha
b)	Tag SIF	SIF.15
c)	Servicio/equipo	Compresor anillo líquido K-1 A/B/C/D
d)	Enclavamiento asociado	SE-5
e)	Intención del diseño	Proteger compresores K-1 A/B/C/D (T _{diseño} .100°C) de alta temperatura en la entrada común (T _{diseño} .340°C).
f)	Elementos sensores	TT-2 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro de los cuatro compresores K-1 A/B/C/D
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre XV-10/20/30/40 en línea impulsión Cierre XV-11/21/31/41 en línea líquido al anillo Cierre XV-12/22/32/42 en línea de agua make-up al sello Abre PV-3 A/B

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Alta temperatura del gas en el colector de antorcha por descargas de emergencia. Temperatura normal del colector 25°C
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de superar la temperatura de diseño (100°C) del compresor de anillo líquido. Si trabajo mucho tiempo en estas condiciones puede provocar un daño catastrófico e irreparable total del compresor. Primero se producirían dilataciones térmicas, comenzando el roce y las vibraciones. Rompiéndose el impulsor, la carcasa y los cojinetes. Se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 10 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	3
	C	2
	F	1
	P	2
	SG	1
	W3: Es un evento esperado varias veces en la vida de la planta, pero no más de una vez al año. C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede	



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	provocar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario) sería seria pudiéndole provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE.
	W 3 E 1 SG 1	F1: La zona de trabajo no es frecuentada por el operario, pudiendo asegurar que su presencia en la zona peligrosa es menor del 10% del P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarlo.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.
	W 3 A 1 SG 1	A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor de anillo líquido aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros y además tenemos pérdidas de producción de 3 días del compresor averiado. Se cataloga como A1.
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	TI-1 con alarma de alta temperatura (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.16

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Recuperación de gases de antorcha
b)	Tag SIF	SIF.16
c)	Servicio/equipo	Compresor anillo líquido K-1 A/B/C/D
d)	Enclavamiento asociado	SE-5
e)	Intención del diseño	Proteger compresores K- 1 A/B/C/D (T _{diseño} .100°C) de alta temperatura en colector de aspiración (T _{diseño} .340°C).
f)	Elementos sensores	TT-4 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro de los cuatro compresores K-1 A/B/C/D
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre XV-10/20/30/40 en línea impulsión Cierre XV-11/21/31/41 en línea líquido al anillo Cierre XV-12/22/32/42 en línea de agua make-up al sello Abre PV-3 A/B

Fallo peligroso en demanda



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo agua de refrigeración a E-1 o apertura accidental del by-pass. Ensuciamiento del cambiador E-1
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de generar daños en el compresor de anillo líquido por superar la temperatura de diseño (100°C). La velocidad de anillo se vería reducida notablemente. Se producirían un importante daño en el impulsor, llegando a romper con cierta facilidad. Esto originará rozamiento, vibraciones y gripaje. Se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	3 C 2 F 1 P 2 SG 1
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 1 SG a
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	TI-3 con alarma de alta temperatura (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

SIF.17/18/19/20

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Recuperación de gases de antorcha
b)	Tag SIF	SIF.17 SIF.18 SIF.19 SIF.20
c)	Servicio/equipo	Compresor anillo líquido K-1 A/B/C/D
d)	Enclavamiento asociado	FAL-11 SE-1 FAL-21 SE-2



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
		FAL-31 SE-3 FAL-41 SE-4
e)	Intención del diseño	Evitar bajo caudal de make-up de H ₂ O al compresor K-1 A Evitar bajo caudal de make-up de H ₂ O al compresor K-1 B Evitar bajo caudal de make-up de H ₂ O al compresor K-1 C Evitar bajo caudal de make-up de H ₂ O al compresor K-1 D
f)	Elementos sensores	FI-11 FI-21 FI-31 FI-41
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Paro del compresor K-001 A Paro del compresor K-001 B Paro del compresor K-001 C Paro del compresor K-001 D
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierre XV-10/20/30/40 en línea impulsión Cierre XV-11/21/31/41 en línea líquido al anillo Cierre XV-12/22/32/42 en línea de agua make-up al sello y si el resto de compresores K-001 están parados: Abre PV-3 A/B

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Filtro obstruido en agua de make-up a compresores de anillo líquido Cierre espurio de XV-12/22/32/44 en línea de make-up a K-1 A/B/C/D No llega agua de stripping.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Cese de aporte de líquido a los cierres, por lo que carece de refrigeración en los mismos. Se producirá un aumento acelerado de la temperatura en el cierre provocando su rotura. Esto desencadenará un grave problema, ya que se producirá la fuga del gas al exterior con posible incendio tipo Jet Fire si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 2 F 1 P 2 SG 1
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	<p>W2: Según la <i>Tabla 5</i>, para un fallo espurio de una válvula de corte, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.</p> <p>C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operario (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, sólo hay un operario) sería seria pudiéndole provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo Jet FIRE.</p> <p>F1: La zona de trabajo no es frecuentada por el operario, pudiendo asegurar que su presencia en la zona peligrosa es menor del 10% del total</p>	



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo						Detalle
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS						<p>P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, ya que el gas puede desmayarle.</p> <p>E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.</p> <p>A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación del compresor de anillo líquido aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10⁵ Euros y además tenemos pérdidas de producción de 3 días del compresor averiado. Se cataloga como A1.</p>
	W	2	A	1	SG	a	
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados						<p>PDSHH-1 con alarma de muy alta presión. (0)</p> <p>(Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)</p>
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):						SIL 1
g)	SIL REQUERIDO						SIL 1

Seguidamente se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el estudio de determinación de SIL de las funciones instrumentadas para esta Unidad.

Enclavamiento	SIF	Descripción de Función Instrumentada de Seguridad (SIF)	SIL	Medición	Acción
SE-1	SIF.1	Protege a cada compresor de alto nivel de líquidos.	a	LSHH-11	Paro compresor K-1 A
SE-2	SIF.2		a	LSHH-21	Paro compresor K-1 B
SE-3	SIF.3		a	LSHH-31	Paro compresor K-1 C
SE-4	SIF.4		a	LSHH-41	Paro compresor K-1 D
SE-5	SIF.5	Protege a los 4 compresores de bajo nivel en el separador trifásico C-2	1	LSLL-2 A/B/C	Paro de los 4 compresores K-1.
SE-1	SIF.6	Protege a cada compresor de baja presión en el sello.	1	PSLL-11 A/B/C	Paro compresor K-1 A
SE-2	SIF.7		1	PSLL-21 A/B/C	Paro compresor K-1 B
SE-3	SIF.8		1	PSLL-31 A/B/C	Paro compresor K-1 C
SE-4	SIF.9		1	PSLL-41 A/B/C	Paro compresor K-1 D
SE-5	SIF.10	Protege a los 4 compresores de alta presión en el colector de descarga.	-	PSHH-6 A/B/C	Paro de los 4 compresores K-1.



SE-1	SIF.11	Protege a cada compresor de bajo caudal de agua en el anillo.	1	FSL-10 A/B/C	Paro compresor K-1 A
SE-2	SIF.12		1	FSL-20 A/B/C	Paro compresor K-1 B
SE-3	SIF.13		1	FSL-30 A/B/C	Paro compresor K-1 C
SE-4	SIF.14		1	FSL-40 A/B/C	Paro compresor K-1 D
SE-5	SIF.15	Protege a los 4 compresores de alta temperatura en la entrada común.	1	TSHH-2 A/BC	Paro de los 4 compresores K-1
	SIF.16	Protege a los 4 compresores de alta temperatura de agua al anillo.	1	TSHH-4 A/BC	Paro de los 4 compresores K-1
SE-1	SIF.17	Protege a cada compresor de bajo caudal de make-up	1	FSL-11	Paro compresor K-1 A
SE-2	SIF.18		1	FSL-21	Paro compresor K-1 B
SE-3	SIF.19		1	FSL-31	Paro compresor K-1 C
SE-4	SIF.20		1	FSL-41	Paro compresor K-1 D

La primera anotación que se puede hacer de esta unidad es que no existe esa mayor relevancia de trabajar con gases con contenido de líquidos, ya que al tratarse de un compresor de anillo líquido, es capaz de trabajar bajo estas condiciones, con un cierto nivel de seguridad. Como tiene que crear un anillo líquido para comprimir el gas, no es un problema si este gas tiene un elevado contenido en líquido, porque será capaz de separarlo durante su funcionamiento.

Otra peculiaridad de estos compresores es que el agua utilizada para formar el anillo líquido procede del separador trifásico antes analizado, pero no se requiere una bomba a la salida del separador para impulsar el agua, ya que el diseño de los 4 compresores en paralelo, como el separador se nivelan para que el agua entre en los compresor por vasos comunicantes. La problemática que nos genera esto es la gran cantidad de SIF asociadas al separador que se deben instalar, ya que cualquier incidencia en este repercute directamente en los compresores.

También cabe destacar la relevancia que en esta unidad tiene la protección para las personas en el cálculo del SIL de las funciones instrumentadas. En todas y cada una de las SIF analizadas, el factor limitante sería la protección para las personas y concretamente en parámetro C2, por lo que se podría estudiar implementar alguna capa de protección independiente extra (IPL), que evite una posible incidencia directa sobre el operario y redujera el nivel de SIL.



El SIL – obtenido para la SIF.10 quiere decir que no hay ningún requisito de seguridad, por lo que se podría eliminar la SIF si se comunica y discute con el equipo PHA y los especialistas correspondientes.

También se ha obtenido un SIL a para las SIF.1/2/3/4, esto quiere decir que no hay un requisito de seguridad especial. En la práctica significa que no se puede eliminar la SIF, pero que se puede considerar (o no) implementarla mediante el controlador y los elementos sensores o como una alarma.

Mientras que para el resto de SIF, se ha obtenido un SIL1, lo que indica que se debe estudiar la arquitectura propuesta para la función, para comprobar que la probabilidad de fallo bajo demanda es de 0.1 a 0.01. En el cálculo de esta probabilidad, se introducen las pruebas periódicas y de mantenimiento a realizar a cada SIF. Debido a que es un SIL.1, es esperable que las pruebas periódicas coincidan con las paradas de la unidad. Todas estas pruebas deben estar específicamente documentadas para posteriormente ser auditables.



4.2.2 Estudio de Bombas

A diferencia de los compresores, las bombas tienen un comportamiento muy similar en cada una de las unidades. En la gran mayoría de los casos, las bombas se instalan en la descarga de los depósitos, las cuales accionadas a través de controladores de nivel instalados en los recipientes, regulan su descarga. En este caso se analizará una serie de bombas críticas de las unidades de Hidrocracker y Gascon.

4.2.2.1 Unidad de Hidrocracker.

A continuación se analizará las bombas críticas de la Unidad de Hidrocracker. Se realizará un estudio HAZOP y determinación del SIL de las funciones instrumentadas asociadas a cada una de las bombas de forma particular.

❖ BOMBA DE CARGA

La bomba de carga es una de las principales bombas si lo extrapolamos a todas las unidades. En esta unidad en concreto, la bomba de carga tiene la misión de enviar a los reactores el HC necesario para que se produzca la correcta reacción. En la entrada de la unidad, se instala un depósito de carga donde se acumula el HC necesario y desde donde es absorbido por esta bomba.

Características de la bomba

Servicio: Bomba principal de alimentación

Bomba centrífuga

Tipo de bomba según el Estándar API 610: BB5

Operación continua

Fluido de trabajo: HC (Alimentación)

Condiciones mecánicas:

Temperatura de bombeo: 200°C

Velocidad de trabajo: 371 m³/h

Presión de descarga: 208.6 Kg/cm² g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada 3210 KW/h

HAZOP desarrollado de la Bomba

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,..) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,..) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,.). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en la bomba, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

CAUDAL

MÁS CAUDAL (A la salida de la bomba G-1 A/B)

Causas

1. Fallo del controlador de presión PC-3 que cierra la válvula PV-3 de entrada de alimentación al depósito de carga.
2. Fallo del controlador de flujo FC-1 situado a la salida de la bomba G-1 A/B que abre la válvula FV-1.
3. Taponamiento del filtro L-1.

Consecuencias

El primer síntoma será la generación de vibraciones en la bomba. Fruto de ello se producirá daño con rotura de los cojinetes. Debido a que esta bomba carece de cierres dobles, se producirá la fuga del fluido de trabajo (HC de carga de alimentación del Hidrocracker) al exterior con posible incendio tipo *Pool Fire* si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de bajo nivel LAL-2 situada en el depósito de carga.
2. Controlador de nivel LC-2 situado en el depósito de carga.
3. Existe un SIS (**SIF.1**) que por muy bajo nivel LSH-3 A/B/C (2 de 3), situado en el depósito de amina pobre detiene la bomba G-1 A/B (**SE-1**).
4. Alarma de alta vibración.

NIVEL**MENOS NIVEL****Causas**

1. Fallo del controlador de nivel LC-2 situado en el depósito de carga.

Consecuencias

Riesgo de daño mecánico a la bomba G-1 por cavitación. Pérdida de eficiencia, debido al aumento de vibración. Picado y erosión de impulsor. Deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos. Ruido anormal. Corrosión. Se producirá la fuga del fluido de trabajo (HC de carga de alimentación del Hidrocracker) al exterior con posible incendio tipo *Pool Fire* si encuentra un punto de ignición.

La **cavitación** se produce por bajo nivel en el depósito de aspiración. Inicialmente se forman burbujas dentro del líquido, creciendo a continuación y colapsando entre ellas a medida que el líquido fluye a través de la bomba.

La *Cavitación Vaporosa* es la forma de cavitación más común en las bombas de proceso. Generalmente ocurre debido a un insuficiente NPSH disponible o a fenómenos de recirculación interna. Se manifiesta como una reducción del desempeño de la bomba, ruido excesivo, alta vibración y desgaste en algunos componentes de la bomba. La extensión del daño puede ir desde unas picaduras

relativamente menores después de años de servicio, hasta fallos catastróficos en un corto periodo de tiempo.

Para evitar la cavitación en toda instalación de bombeo se procurará que el valor de la presión absoluta obtenida no sea inferior a la necesaria para producir la aceleración del líquido y que sea superior a la tensión del vapor del líquido impulsado a la temperatura existente.

NPSH (Net Positive Suction Head)

Por definición el NPSH es la altura total de carga a la entrada de la bomba, medida con relación al plano de referencias.

Conceptos:

NPSH (Requerido)

Presión absoluta mínima en el oído del impulsor que garantiza un flujo sano en el interior de la bomba. Es un dato básico característico de cada tipo de bomba, variable según el modelo y tamaño y condiciones de servicio, por tanto es un dato que facilitan los fabricantes.

Se obtiene a partir de la fórmula

$$NPSHr = H_z - \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Donde:

H_z = Presión absoluta mínima necesaria en la zona inmediata anterior a los alabes.
 $V^2/2g$ = Carga cinética correspondiente a la velocidad de entrada del líquido en la boca del impulsor

NPSH (Disponible)

Presión absoluta total en el oído del impulsor como resultado final de la aspiración específica de las condiciones de la instalación. Es función de la instalación e independiente del tipo de bomba:

$$NPSHd = \frac{P_{atm}}{\gamma} - H_g - H_f - H_a - \frac{T_v}{\gamma}$$

Donde:

P_{atm} = presión atmosférica (m.)
 H_g = altura geométrica de aspiración (m.)
 H_f = pérdidas de carga por fricción (m)
 H_a = pérdidas de carga por accesorios (m)
 T_v = tensión de vapor (m)

Para un funcionamiento correcto de una instalación se debe verificar siempre que:

$$NPSHd \geq NPSHr$$



Salvaguardas

1. Alarma de bajo flujo de alimentación FAL-2 situada a la entrada de carga de Hidrocracker.
2. Existe un SIS (**SIF.1**) que por muy bajo nivel LSLL-3 A/B/C (2 de 3), situado en el depósito de carga detiene la bomba G-1 A/B (**SE-1**).
3. Corte válvula de aislamiento EIV-1.

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Bomba

Consideraciones previas realizadas para la bomba de Carga de la Unidad de Hidrocracker. (Ver el P&ID 6 del Anexo 1)

Norma 1: Al igual que se consideró para el estudio de los compresores de esta unidad, el turno estará formado dos operarios de campo y otro de panel. Los dos operarios de campo únicamente dan servicio a esta Unidad.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición de la bomba de carga de tipo centrífugo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10⁶ Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 1 semana; mientras que si no es catastrófico no superará los 10⁶ Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 3 días. En este caso no habrá paro de la producción, ya que siempre se instalan 2 o incluso 3 bombas en paralelo para evitarlo.

A continuación se realiza el estudio SIL de las funciones instrumentadas asociadas a esta bomba. (**G-1 Bomba de carga**)

SIF.1 Protege al compresor de bajo nivel en depósito de carga

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF.1
c)	Servicio/equipo	Nivel en recipiente C-1 (Depósito de carga)
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Proteger un muy bajo nivel en el depósito de carga, para prevenir fugas en cierres de la bomba G-1 A/B.
f)	Elementos sensores	LT-3 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Para la bomba de carga (1oo2)
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle									
a)	Causas	Fallo del controlador de presión PC-3 que cierra la válvula PV-3 de entrada de alimentación al depósito de carga. Fallo del controlador de flujo FC-1 situado a la salida de la bomba G-1 A/B que abre la válvula FV-1. Taponamiento del filtro L-1.									
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de daño mecánico a la bomba G-1 por cavitación. Pérdida de eficiencia, debido al aumento de vibración. Picado y erosión de impulsor. Deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos. Ruido anormal. Corrosión. Se producirá la fuga del fluido de trabajo (HC de carga de alimentación del Hidrocracker) al exterior con posible incendio tipo <i>Pool Fire</i> si encuentra un punto de ignición.									
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 2 min									
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes										
	SEGURIDAD PERSONAL										
	W	2	C	2	F	1	P	2	SG	1	
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL										
	W	2	E	1	SG	a					
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS										
	W	2	A	2	SG	1					W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta. C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar a los operarios (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, hay dos operario de planta) sería seria, pudiéndoles provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo <i>Pool Fire</i> . A pesar de tener 2 operarios en planta, consideraremos que sólo puede llegar a sufrir la muerte uno de ellos, ya que la probabilidad de que ambos estén en el escenario de peligro es prácticamente nula. F1: Independientemente de que haya 2 operarios en planta en esta unidad (norma 1), su presencia en las cercanías de la bomba es menor que en el caso de los compresores, por lo que consideramos F1 como parámetro de exposición. P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, si la fuga se produce de forma repentina. E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas. A2: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación de una bomba de carga de tipo centrífuga aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10 ⁶ Euros, y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción ya que tenemos 2 bombas en paralelo para evitarlo, se cataloga como A2.
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de bajo flujo FAL-2. (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)									
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1									
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1									

❖ **BOMBA DE AGUA DE LAVADO**

El agua de lavado procedente del Stripper de aguas ácidas es acumulada en un depósito presurizado por fuel gas. La bomba de agua de lavado, es la encargada de suministrar agua de lavado a los equipos que lo requieran. En este caso, dicho agua es enviado a un depósito separador de alta presión, anterior al depósito absorbedor de aminas que se observó en el análisis de compresores de esta Unidad.

Características de la bomba:

Servicio: Bomba de agua de lavado

Bomba centrífuga

Tipo de bomba según el Estándar API 610: OH6 (Multi-etapa)

Operación continua

Fluido de trabajo: Agua de lavado

Condiciones mecánicas:

Temperatura de bombeo: 48 °C

Velocidad de trabajo: 66 m³/h

Presión de descarga: 164.2 Kg/cm² g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada 599 KW/h

HAZOP desarrollado de la Bomba

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,...) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,...) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,...). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en la bomba, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

PRESIÓN

MÁS PRESIÓN

Causas

1. Fallo del controlador de presión PC-1 situado en la entrada de Fuel-Gas al depósito, que abre la válvula PV-1 A, permitiendo la entrada de Fuel-Gas de manera incontrolada y cierra la válvula PV-1 B, que se encarga de regular al entrada de Fuel-Gas al depósito enviándolo a la antorcha.
2. Cierre de la válvula de corte XV-1 situada a la salida de las bombas G-2 A/B.

Consecuencias

Para la primera causa se producirá un aumento en la presión de entrada, mientras que para la segunda causa se produce una disminución en la presión de salida. Ambas causas reducen el incremento de presión, por lo que disminuye el caudal. Provocando vibraciones, daños en cojinetes y cierres. Se trata de un daño catastrófico donde rompe toda la bomba. Se producirá fuga del fluido de trabajo al exterior (agua de lavado) sin posibilidad de ignición, aunque por la presión tan



elevada de descarga (más relevante que la alta temperatura) puede provocar daños moderados a los operarios.

Salvaguardas

1. PSV-1 situada en el depósito de agua de lavado.
2. Presión de diseño del equipo superior a la presión de diseño del servicio de fuel gas.
3. Alarma de bajo flujo FAL-1, situada en la salida de la bomba G-2.
4. PSV-2 situada en la salida de la bomba.

CAUDAL

MENOS CAUDAL

Causas

1. Fallo espurio y apertura de la válvula de corte XV-1

Consecuencias

Daño mecánico en bomba G-2 A/B. Fuga menor de agua tratada por los cierres. Al quedarse sin agua no se produce refrigeración ni lubricación de los cierres, por lo que aumenta su temperatura, provocando un gripaje del impulsor. También vendrá acompañado de elevadas vibraciones y recirculación interna del producto, que provocarán la rotura de los cojinetes. Se producirá fuga del fluido de trabajo al exterior (agua de lavado) sin posibilidad de ignición, aunque por la presión tan elevada de descarga (más relevante que la alta temperatura) puede provocar daños moderados a los operarios.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.2**) que por muy bajo flujo FSLL A/B/C (2 de 3), situado a la descarga de las bombas detiene la bomba G-2 A/B (**SE-2**).

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Bomba

Consideraciones previas realizadas para la bomba de Agua de Lavado de la Unidad de Hidrocracker: (Ver el P&ID 7 del Anexo 1)

Norma 1: Al igual que se consideró para el estudio de los compresores de esta unidad, el turno estará formado dos operarios de campo y otro de panel. Los dos operarios de campo únicamente dan servicio a esta Unidad.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición de la bomba de agua de lavado de tipo centrífugo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10^5 Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 1 semana; mientras que si no es catastrófico el precio de reposición también será superior a los 10^5 Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 3 días. En este caso no habrá paro de la producción, ya que siempre se instalan 2, o incluso 3, bombas en paralelo para evitarlo.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

A continuación se realiza el estudio SIL de las funciones instrumentadas asociadas a esta bomba. **(G-2 Bomba de agua de lavado)**

SIF.2 Protege a la bomba G-2 de bajo nivel en depósito C-1

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF.2
c)	Servicio/equipo	Muy bajo caudal en el descarga de la bomba G-2 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-2
e)	Intención del diseño	Proteger un muy bajo nivel en el depósito de carga, para prevenir fugas en cierres de la bomba G-2 A/B.
f)	Elementos sensores	FT-2 A/B/C
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Para la bomba de carga (1002)
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Disparo en falso de la válvula XV-1
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Daño mecánico en bomba G-2 A/B. Fuga menor de agua tratada por los cierres. Al quedarse sin agua, no se produce refrigeración ni lubricación de los cierres, por lo que aumenta su temperatura, provocando un gripaje del impulsor. También vendrá acompañado de elevadas vibraciones y recirculación interna del producto, que provocaran la rotura de los cojinetes. Se producirá fuga del fluido de trabajo al exterior (agua de lavado) sin posibilidad de ignición, aunque por la presión tan elevada de descarga (más relevante que la alta temperatura) puede provocar daños moderados a los operarios.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 1 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
SEGURIDAD PERSONAL		W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo espurio de una válvula de corte, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
W	2 C 1 F - P - SG -	C1: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar a los operarios (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, hay dos operario de planta) sería moderada. A pesar de tener 2 operarios en planta, consideraremos que sólo puede llegar a sufrir un posible impacto por la fuga de agua a elevada presión.
PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL		
W	2 E 1 SG a	F1: Independientemente de que haya 2 operarios en planta en esta unidad (norma 1), su presencia en las cercanías de la bomba es menor que en el caso de los compresores, por lo que consideramos F1 como parámetro de exposición.
PROTECCIÓN DE ACTIVOS		P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, si la fuga se produce de forma repentina.

Ref	Campo						Detalle
	W	2	A	1	SG	a	<p>E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.</p> <p>A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación de una bomba de agua de lavado de tipo centrífuga aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10^5 Euros, y como en caso no tenemos pérdidas por paro de producción ya que tenemos 2 bombas en paralelo para evitarlo, se cataloga como A1.</p>
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados						-
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):						SIL a
g)	SIL REQUERIDO						SIL a

❖ BOMBA DE REFLUJO CIRCULANTE DIESEL

La bomba de reflujo circulante diesel, tiene la misión de vaciar el plato de la fraccionadora donde se queda depositado el diesel. Enviando parte del diesel al Stripper lateral de diesel para introducirlo de nuevo en la fraccionadora a un nivel inferior. Otra parte lo hace atravesar un intercambiador, donde lo enfría y lo introduce de nuevo en la fraccionadora a un mayor nivel. Y el resto lo recircula e introduce directamente en la fraccionadora al nivel inmediatamente inferior.

Características de la bomba:

Servicio: Bomba de reflujo de diesel

Bomba centrífuga

Tipo de bomba según el Estándar API 610: BB2

Operación continua

Fluido de trabajo: DIESEL (HC)

Condiciones mecánicas:

Temperatura de bombeo: 287 °C

Velocidad de trabajo: 547.8 m³/h

Presión de descarga: 8.6 Kg/cm² g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada 208 KW/h

HAZOP desarrollado de la Bomba

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,...) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,...) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,...). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en la bomba, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

NIVEL

MENOS NIVEL (En fraccionadora)



Causas

1. Fallo del controlador de nivel LC-1 situado en la fraccionadora, que acciona el controlador de flujo FC-1 abriendo la válvula FV-1.

Consecuencias

Riesgo de daño mecánico a la bomba G-1 por cavitación. Pérdida de eficiencia, debido al aumento de vibración. Picado y erosión de impulsor. Deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos. Ruido anormal. Corrosión. Se producirá la fuga del fluido de trabajo (diesel) al exterior con posible incendio tipo *Pool Fire* si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de bajo nivel FAL-3 situada en la fraccionadora.

CAUDAL

NO CAUDAL

Causas

1. Fallo y cierre de la válvula de aislamiento EIV-1, situada en la entrada de la bomba de reflujo circulante de diesel G-10.

Consecuencias

Trabajo en vacío o seco, es decir, sin líquido. No se produce refrigeración ni lubricación de los cierres, por lo que aumenta su temperatura, provocando el gripaje del impulsor. También vendrá acompañado de elevadas vibraciones y recirculación interna del producto, que provocaran la rotura de los cojinetes. Se producirá la fuga del fluido de trabajo (diesel) al exterior con posible incendio tipo *Pool Fire* si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.3**) que por señal de cierre de final de carrera de la válvula de aislamiento EIV-1 ZSH-1 y ZSL-1 (2oo2), detiene la bomba (**SE-3**).

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Bomba

Consideraciones previas realizadas para la bomba de Reflujo Circulante de Diesel de la Unidad de Hidrocracker: (Ver el P&ID 8 del Anexo 1)

Norma 1: Al igual que se consideró para el estudio de los compresores de esta unidad, el turno estará formado dos operarios de campo y otro de panel. Los dos operarios de campo únicamente dan servicio a esta Unidad.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición de la bomba de reflujo circulante de diesel de tipo centrífugo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10⁵ Euros,



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

con un tiempo aproximado de reparación de 1 semana; mientras que si no es catastrófico el precio de reposición también será superior a los 10⁵ Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 3 días. En este caso no habrá paro de la producción, ya que siempre se instalan 2, o incluso 3, bombas en paralelo para evitarlo.

A continuación se realiza el estudio SIL de las funciones instrumentadas asociadas a esta bomba. **(G-10 Bomba de reflujo circulante diesel)**

SIF.3 Protege a la bomba G-10 de menos/no caudal

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF.3
c)	Servicio/equipo	Bomba G-10
d)	Enclavamiento asociado	SE-3
e)	Intención del diseño	Proteger la bomba G-10 A/B por no caudal.
f)	Elementos sensores	ZSL-1/ZSH-1
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Para la bomba G-10 A/B
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo espurio y cierre de la aislamiento EIV-1.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Trabajo en vacío o seco, es decir, sin líquido. No se produce refrigeración ni lubricación de los cierres, por lo que aumenta su temperatura, provocando el gripaje del impulsor. También vendrá acompañado de elevadas vibraciones y recirculación interna del producto, que provocaran la rotura de los cojinetes. Se producirá la fuga del fluido de trabajo (diesel) al exterior con posible incendio tipo <i>Pool Fire</i> si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 10 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo espurio de una válvula de corte (aislamiento en este caso), por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
	W 2 C 2 F 1 P 2 SG 1	C2: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar a los operarios (según la <i>norma 1</i> para esta unidad, hay dos operario de planta) sería seria, pudiéndoles provocar la muerte si la fuga encontrase un punto de ignición y se produjera un incendio tipo <i>Pool FIRE</i> . A pesar de tener 2 operarios en planta, consideraremos que sólo puede llegar a sufrir la muerte uno de ellos, ya que la probabilidad de que ambos estén en el escenario de peligro es
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W 2 E 1 SG a	

Ref	Campo	Detalle
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	prácticamente nula F1: Independientemente de que haya 2 operarios en planta en esta unidad (norma 1), su presencia en las cercanías de la bomba es menor que en el caso de los compresores, por lo que consideramos F1 como parámetro de exposición. P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, si la fuga se produce de forma repentina. E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas. A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación de una bomba de reflujo circulante de diesel de tipo centrífuga aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros, y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción ya que tenemos 2 bombas en paralelo para evitarlo, se cataloga como A1.
	W 2 A 1 SG a	
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	-
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

❖ BOMBA DE AMINA

La bomba de amina tiene la función de enviar la amina acumulada en el depósito de amina pobre procedente de su unidad de formación, al depósito separador de alta presión, donde se pone en contacto con el agua de lavado anteriormente analizado. Desde allí se envía al absorbedor de amina, de donde se introducirá al proceso de la unidad de Hidrocracker para formar el gas de recicl.

Características de la bomba:

Servicio: Bomba de amina pobre hacia depósito de amina de alta presión

Bomba centrífuga

Tipo de bomba según el Estándar AP 610: BB5

Operación continua

Fluido de trabajo: Amina pobre

Condiciones mecánicas:

Temperatura de bombeo: 55 °C

Velocidad de trabajo: 136.2 m³/h

Presión de descarga: 156.4 Kg/cm² g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada 1020 KW/h

HAZOP desarrollado de la Bomba

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,...) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel,

Caudal,..) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,.). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en la bomba, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

PRESIÓN**MÁS PRESIÓN****Causas**

1. Fallo del controlador de presión PC-1 situado a la entrada de Nitrógeno al depósito que abre la válvula PV-1 A permitiendo la entrada descontrolada de Nitrógeno, que es el encargado de presurizar el depósito para mantener la presión de aspiración de la bomba constante y que cierra la válvula PV-1 B que regula el Nitrógeno enviándolo a la antorcha.

Consecuencias

Se producirá un aumento en la presión de entrada, reduciendo el incremento de presión, por lo que disminuye el caudal de salida. Provoca vibraciones, daños en cojinetes y cierres. Se trata de un daño catastrófico donde rompe toda la bomba. Se producirá fuga al exterior, pero por la alta presión de trabajo de la amina pobre puede llegar a provocar daños moderados a los operadores. Sin consecuencias para la seguridad de los equipos.

Salvaguardas

1. PSV-1 (En el depósito de amina pobre)

MENOS PRESIÓN**Causas**

1. Fallo del controlador de presión PC-1 situado a la entrada de Nitrógeno al depósito que cierra la válvula PV-1 A y abre la válvula PV-1 B.

Consecuencias

Disminuyendo la presión a la entrada, como la bomba trata de mantener el mismo ΔP , la presión a la salida aumentará, pero lo que disminuirá el caudal, pudiendo incluso llegar a trabajar en vacío, con las vibraciones. Se producirá fuga al exterior, pero por tratarse amina pobre no tendrá consecuencias para los operarios ni para la seguridad de los equipos.

Salvaguardas

1. Doble válvula de retención en impulsión de las bombas G-17A/B.
2. Controlador de mínimo caudal FT-2
3. Existe un SIS (**SIF.5**) que por muy bajo flujo FSLL-1 (1 de 1), situado a la salida de las bombas G-17 A/B, detiene las bombas G-17 A/B y cierra la válvula XV-2 (**SE-5**).



NIVEL

MENOS NIVEL (amina pobre)

Causas

1. Fallo del controlador de nivel LC-2 situado en el depósito de amina pobre, que cierra la válvula LV-2.
2. Fallo espurio y cierre de la válvula de corte XV-1.

Consecuencias

Riesgo de daño mecánico a la bomba G-17 por cavitación. Pérdida de eficiencia, debido al aumento de vibración. Picado y erosión de impulsor. Deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos. Ruido anormal. Corrosión Se producirá fuga al exterior, pero por la alta presión de trabajo de la amina pobre puede llegar a provocar daños moderados a los operadores. Sin consecuencias para la seguridad de los equipos.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.4**) que por muy bajo nivel LSLL-3 A/B/C (2 de 3), situado en el depósito de amina pobre que detiene la bomba G-17 A/B y cierra la válvula de corte XV-2 situada a la salida de las bombas (**SE-4**).
2. Alarma de bajo nivel LAL-2 situada en el depósito de amina pobre.

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Bomba

Consideraciones previas realizadas para la bomba de Amina de la Unidad de Hidrocracker: (Ver el P&ID 9 del Anexo 1)

Norma 1: Al igual que se consideró para el estudio de los compresores de esta unidad, el turno estará formado dos operarios de campo y otro de panel. Los dos operarios de campo únicamente dan servicio a esta Unidad.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición de la bomba de amina de tipo centrífugo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10^5 Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 1 semana; mientras que si no es catastrófico el precio de reposición también será superior a los 10^5 Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 3 días. En este caso no habrá paro de la producción, ya que siempre se instalan 2, o incluso 3, bombas en paralelo para evitarlo.

A continuación se realiza el estudio SIL de las funciones instrumentadas asociadas a esta bomba. (**G-17 Bomba de amina**)

SIF.4 Protege a la bomba G-17 de bajo nivel en el deposito C-1



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF.4
c)	Servicio/equipo	Bomba G-17 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-4
e)	Intención del diseño	Proteger la bomba G-17 A/B de un muy bajo nivel en del depósito de amina pobre.
f)	Elementos sensores	LT-3
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Para la bomba G-17 A/B
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierra XV-2

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo de controlador de nivel LC-2, que cierra la válvula LV-2 Fallo y cierre la de válvula XV-1.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de daño mecánico a la bomba G-17 por cavitación. Pérdida de eficiencia, debido al aumento de vibración. Picado y erosión de impulsor. Deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos. Ruido anormal. Corrosión Se producirá fuga al exterior, pero por la alta presión de trabajo de la amina pobre puede llegar a provocar daños moderados a los operadores. Sin consecuencias para la seguridad de los equipos.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 1 F - P - SG -
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 0 SG -
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W	2 A 1 SG a

W2: Según la *Tabla 5*, para un fallo espurio de una válvula de corte o un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.

C1: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar a los operarios (según la *norma 1* para esta unidad, hay dos operarios de planta) sería moderada. A pesar de tener 2 operarios en planta, consideraremos que sólo puede llegar a sufrir un posible impacto por la fuga de amina a elevada presión.

F1: Independientemente de que haya 2 operarios en planta en esta unidad (*norma 1*), su presencia en las cercanías de la bomba es menor que en el caso de los compresores, por lo que consideramos F1 como parámetro de exposición.

P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, si la fuga se produce de forma repentina.

E0: La fuga de productos no tendría consecuencias medio ambientales.

A1: Como se indicó en la *norma 2* de esta unidad, el coste de reparación de una bomba de amina de tipo centrífuga aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10^5 Euros, y como en caso no tenemos pérdidas por paro de producción ya que tenemos 2 bombas en paralelo para evitarlo, se cataloga como A1.



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de bajo nivel LAL-2. (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a
g)	SIL REQUERIDO	SIL a

SIF.5 Protege a la bomba G-17 de menos/no caudal

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Hidrocracker
b)	Tag SIF	SIF.5
c)	Servicio/equipo	Bomba de alta presión de amina pobre.
d)	Enclavamiento asociado	SE-5
e)	Intención del diseño	Proteger la bomba G-17 A/B de un muy bajo caudal.
f)	Elementos sensores	FT-1
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Para la bomba G-17 A/B
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	Cierra XV-2

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo del controlador de presión PC-1, que cierra la válvula PV-1 ^a y abre la válvula PV-1B.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Disminuyendo la presión a la entrada, como la bomba trata de mantener el mismo ΔP , la presión a la salida aumentará, pero lo que disminuirá el caudal, pudiendo incluso llegar a trabajar en vacío, con las vibraciones. Se producirá fuga al exterior, pero por tratarse amina pobre no tendrá consecuencias para los operarios ni para la seguridad de los equipos.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo de un controlador, por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
	W 2 C 0 F - P - SG -	C0: Como consecuencias de una fuga al exterior, como se ha indicado

Ref	Campo	Detalle
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	antes no provocará daño alguno sobre el operario por tratar se de amina pobre (sin contenido en sulfhídrico).
	W 2 E 0 SG -	F1: Independientemente de que haya 2 operarios en planta en esta unidad (norma 1), su presencia en las cercanías de la bomba es menor que en el caso de los compresores, por lo que consideramos F1 como parámetro de exposición.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	P2: El operario no tiene capacidad de reacción y evitar el suceso, si la fuga se produce de forma repentina.
	W 2 A 1 SG a	E0: La fuga de productos no tendría consecuencias medio ambientales. A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación de una bomba de amina de tipo centrífuga aproximado para un fallo considerado como no catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros, y como en este caso no hay pérdidas por paro de producción ya que tenemos 2 bombas en paralelo para evitarlo, se cataloga como A1.
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Controlador de mínimo caudal FT-2 (0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se les puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma).
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a
g)	SIL REQUERIDO	SIL a

Seguidamente se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el estudio de determinación de SIL de las funciones instrumentadas para esta Unidad.

Enclavamiento	SIF	Descripción de Función Instrumentada de Seguridad (SIF)	SIL
SE-1	SIF.1	Protege al compresor de bajo nivel en depósito de carga.	1
SE-2	SIF.2	Protege a la bomba G-2 de bajo nivel en depósito de agua de lavado.	a
SE-3	SIF.3	Protege a la bomba G-10 (reflujo diesel) de menos/no caudal.	1
SE-4	SIF.4	Protege a la bomba G-17 de bajo nivel en el deposito amina pobre	a
	SIF.5	Protege a la bomba G-17 (amina) de menos/no caudal.	a

Primero hay que destacar que las causas que provocan un daño en la bomba vienen determinadas por un bajo nivel en su depósito de aspiración o por bajo caudal de fluido de trabajo.

Las consecuencias que provocan cada desviación o fallo de proceso, como se han analizado en el Hazop, es muy similar en cuanto al daño de la bomba, pero puede variar sus consecuencias en función del fluido de trabajo. A raíz de los resultados del estudio SIL se puede observar este efecto, ya que para la bomba de carga y diesel, el fluido de trabajo son HC a una elevada temperatura, por lo que puede llegar a provocar una explosión en caso de fuga. Así mismo, una fuga en la bomba de agua de lavado y de la bomba de amina puede provocar daños moderados al operario ya que la presión de trabajo de ambas bombas es muy elevada.



Un *SIL* quiere decir que no hay un requisito de seguridad especial. En la práctica significa que no se puede eliminar la SIF, pero que se puede considerar (o no) implementarla mediante el controlador y los elementos sensores o como una alarma. En ambos casos, se recomienda mantener la función y no sustituirla por alarma y actuación del operador, debido al bajo tiempo de seguridad del proceso.

Un SIL1 para una SIF, indica que se debe estudiar la arquitectura propuesta para la función, para comprobar que la probabilidad de fallo bajo demanda es de 0.1 a 0.01. En el cálculo de esta probabilidad, se introducen las pruebas periódicas y de mantenimiento a realizar a cada SIF. Debido a que es un SIL1, es esperable que las pruebas periódicas coincidan con las paradas de la unidad. Todas estas pruebas deben estar específicamente documentadas para posteriormente ser auditables.



4.2.2.2 Unidad de Coquer.

A continuación se analizará 2 bombas críticas de la Unidad de Gascon (Unidad de Concentración de gases). Se realizará un estudio HAZOP y determinación del SIL de las funciones instrumentadas asociadas a cada una de las bombas de forma particular.

❖ **BOMBA DE CARGA AL HORNO**

En esta unidad en concreto, la bomba de carga al horno, como el propio nombre indica, es la encargada de proporcionar al horno el combustible necesario para su funcionamiento. Este combustible lo obtiene de la parte del crudo no fraccionada (nivel más inferior) en la fraccionadora de Coquer.

Características de la bomba:

Servicio: Bomba de agua de lavado

Bomba centrífuga

Tipo de bomba según el Estándar API 610: BB5

Operación continua

Fluido de trabajo: Carga de Coquer caliente

Condiciones mecánicas (para alta presión):

Temperatura de bombeo: 314 °C

Velocidad de trabajo: 272.7 m³/h

Presión de descarga: 50.14 Kg/cm² g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada 544 KW

HAZOP desarrollado de la Bomba

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,..) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,..) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,.). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en la bomba, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

CAUDAL

MENOS CAUDAL

Causas

1. Fallo del controlador de nivel LC-1 que cierre las válvulas de entrada de residuo de vacío FV-1 y FV-2.
2. Se produce un fallo espurio y se cierra la válvula de aislamiento EIV-1 y obstruye el proceso.

Consecuencias

La primera causa produce cavitación, es decir, picado y erosión de impulsor, deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en

rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos; ruido anormal y corrosión.

La segunda causa produce trabajo en seco, es decir, fuga de sustancia por sellos de bombas (sólo se producirá fuga por el interior de la bomba, ya que al disponer de cierres dobles se evita de salida del producto al exterior), carencia de refrigeración y lubricación, aumento de temperatura por rozamiento, vibraciones.

En ambos puede producirse fuga del fluido de trabajo (HC de carga al horno) al exterior con posible incendio tipo *Pool Fire* si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1.
 - a) Alarma de bajo nivel LAL-1 (Detector Nuclear) situada en la parte inferior de la fraccionadora.
 - b) Alarma de muy bajo nivel LALL-1 (Detector Nuclear) situada en la parte inferior de la fraccionadora.
 - c) Alarma de bajo nivel LAL-2 situada en la parte inferior de la fraccionadora.
 - d) Alarma de muy bajo nivel LALL-2 situada en la parte inferior de la fraccionadora.
 - e) Sellos dobles en bombas con fluido barrera, de acuerdo con norma API.
 - f) EIV-2 (válvula de aislamiento)
 - g) EIV-1 (válvula de aislamiento)
2.
 - a) Existe un SIS (**SIF.1**) que por señal de cierre de final de carrera de la válvula de aislamiento EIV-1, ZSH-1 y ZSL-1 (2oo2), detiene las bomba G-2 A/B, inhibe el autoarranque de la bomba de reserva G- 2 C, y cierra de la válvula de aislamiento EIV-2 (**SE-1**).
 - b) Alarma de alta vibración.

TEMPERATURA MÁS TEMPERATURA

Causas

1. Se produce una alta temperatura en fondo de fraccionadora C-1, cercana a la temperatura de diseño de línea y bombas, durante la puesta en marcha.

Consecuencias

Si se trabaja a temperaturas superiores a la de diseño de la bomba (371 °C), se producirá una dilatación de los componentes de la bomba. Dependiendo de los materiales de que estén hechos, la dilatación comenzará antes en unos que en otros. Principalmente sufrirá la parte hidráulica, como son los cierres y el impulsor. Se producirá fuga del fluido de trabajo (HC de carga al horno) al exterior con posible incendio tipo *Pool Fire* si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Alarma de alta temperatura en TI-1 en la salida de la fraccionara del Coquer, que se activará para un temperatura superior a 371 °C.



NIVEL

MÁS NIVEL

Causas

1. Arrastre de coque desde las cámaras.
2. Fallo del nivel de LC-4 sobre el plato de la fraccionadora, que cierra la válvula LV-4 de salida de Gas Oil de Coquer pesado de la fraccionadora del Coquer.

Consecuencias

Inundación del plato P1. Desbordamiento por el interior de la torre a secciones inferiores. Calentamiento del fondo de la fraccionadora. Riesgo de daño mecánico en sellos de bombas. Se producirá fuga del fluido de trabajo (HC de carga al horno) al exterior con posible incendio tipo *Pool Fire* si encuentra un punto de ignición.

Salvaguardas

1. Sellos dobles en bombas con fluido barrera, de acuerdo con norma API.
2. EIV-2 (Válvula de aislamiento)
3. EIV-1 (G-A/B/C) (Válvula de aislamiento)

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Bomba

Consideraciones previas realizadas para la bomba de Carga de la Unidad de Gascon.
(Ver el P&ID 10 del Anexo 1)

Norma 1: Se considera que el turno estará formado por un operario de campo y otro de panel. El operario de campo únicamente da servicio a esta Unidad.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición de la bomba de carga de tipo centrífugo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10⁶ Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 1 semana; mientras que si no es catastrófico no superará los 10⁶ Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 3 días. En este caso no habrá paro de la producción, ya que siempre se instalan 2 o incluso 3 bombas en paralelo para evitarlo.

A continuación se realiza el estudio SIL de las funciones instrumentadas asociadas a esta bomba. **(G-2 Bomba de carga al horno)**

SIF.1 Protege a la bomba G-2 de trabajar sin caudal

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Coquer
b)	Tag SIF	SIF.1
c)	Servicio/equipo	Bomba G-2 A/B/C



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Ref	Campo	Detalle
d)	Enclavamiento asociado	SE-1
e)	Intención del diseño	Evitar daños a las bombas de carga al horno G-2 A/B/C
f)	Elementos sensores	ZSL-1, ZSH-1
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parada de las bombas G-2 A/B. Inhibición del arranque automático de la bomba G-2 C.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo del controlador de nivel LC-1 que cierre las válvulas de entrada de residuo de vacío FV-1 y FV-2. Se produce un fallo espurio y se cierra la válvula de aislamiento EIV-1 y obstruye.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	La primera causa produce cavitación, es decir, picado y erosión de impulsor, deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos; ruido anormal y corrosión. La segunda causa produce trabajo en seco, es decir fuga de sustancia por sellos de bombas (sólo se producirá fuga por el interior de la bomba, ya que al disponer de cierres dobles se evita de salida del producto al exterior), carencia de refrigeración y lubricación, aumento de temperatura por rozamiento, vibraciones. En ambos puede producirse fuga del fluido de trabajo (HC de carga al horno) al exterior con posible incendio tipo <i>Pool Fire</i> si encuentra un punto de ignición.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	30 min.
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	
	W	2 C 1 F - P - SG -
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	
	W	2 E 1 SG a
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
W	2 A 2 SG 1	



Ref	Campo	Detalle
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	Alarma de alta vibración.(0) (Como el tiempo de seguridad es menor de 40 min, no se le puede asignar ningún crédito a los operadores encargados de actuar tras la actuación de una alarma)
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL 1
g)	SIL REQUERIDO	SIL 1

❖ **BOMBA DE AGUA DE CORTE**

La bomba de agua de corte, es similar a la analizada anteriormente, bomba de lavado. Esta es característica de la unida de Coquer ya que envía a elevada presión agua contra las paredes del depósito de decoquizado de forma intermitente, que permite realizar satisfactoriamente su limpieza.

Características de la bomba:

Servicio: Bomba de agua de corte

Bomba centrífuga

Tipo de bomba según el Estándar API 610: BB5

Operación continua

Fluido de trabajo: Agua

Condiciones mecánicas:

Temperatura de bombeo: 66°C

Velocidad de trabajo: 272.8 m³/h

Presión de descarga: 295.3 Kg/cm² g

Accionamiento eléctrico de potencia estimada 3921 KW

HAZOP desarrollado de la Bomba

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,..) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,..) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,.). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en la bomba, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

NIIVEL

MENOS NIVEL

Causas

1. Fallo del controlador de flujo FC-1, situado a la entrada de agua de stripper al depósito, que cierra la válvula FV-1 durante un largo periodo de tiempo.

Consecuencias



Riesgo de daño mecánico a la bomba G-9 por cavitación. Pérdida de eficiencia, debido al aumento de vibración. Picado y erosión de impulsor. Deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos. Ruido anormal. Corrosión. Se producirá fuga del fluido de trabajo al exterior (agua de corte) sin posibilidad de ignición, aunque por la presión tan elevada de descarga (más relevante que la alta temperatura) puede provocar daños moderados a los operarios.

Salvaguardas

1. Existe un SIS (**SIF.2**) que por muy alto nivel LC-2 (1 de 1), situado en el depósito de decoquizado de agua detiene la bomba G-9 (**SE-2**).

CAUDAL

MENOS CAUDAL

Causas

1. Obstrucción de la línea de drenaje común del depósito de decoquización de agua D-1 al PAD.

Consecuencias

Acumulación de finos en el fondo del tanque. Rotura de toda la parte hidráulica. Los cierres sufren muchísimo ante el contacto de partículas sólidas, rompiendo rápidamente. Como consecuencias se producirán elevadas vibraciones. Se producirá fuga del fluido de trabajo al exterior (agua de corte) sin posibilidad de ignición, aunque por la presión tan elevada de descarga (más relevante que la alta temperatura) puede provocar daños moderados a los operarios.

Salvaguardas

1. Diseño de las redes de drenaje para evitar la llegada de finos de coque a la red general de pluviales (tener en cuenta además episodios de lluvias torrenciales).

COMPOSICIÓN

OTRA COMPASICIÓN

Causas

1. Alto contenido de sulfhídrico en corriente de alimentación de agua de stripper.

Consecuencias

Riesgo de corrosión de los materiales a muy largo plazo. Esto provocará un fallo en su funcionalidad. Sin fugas al exterior.

Salvaguardas

1. Instalación de detectores de sulfhídrico en el área del tanque D-1.



2. Chequear el diseño y la elección de materiales en caso de que la bomba pueda trabajar con sulfhídrico.

Determinación del SIL de las funciones instrumentadas de la Bomba

Consideraciones previas realizadas para la bomba de Agua de Corte de la Unidad de Gascon: (Ver el P&ID 11 del Anexo 1)

Norma 1: Se considera que el turno estará formado por un operario de campo y otro de panel. El operario de campo únicamente da servicio a esta Unidad. La zona de corte de la bomba se considera como muy frecuente para el operario.

Norma 2: Se considera que el precio de reposición de la bomba de agua de corte de tipo centrífugo de esta unidad tras fallo catastrófico será superior de 10^5 Euros, con un tiempo aproximado de reparación de 1 semana; mientras que si no es catastrófico el precio de reposición también será superior a los 10^5 Euros y su tiempo de reparación será de aproximadamente 3 días. En este caso no habrá paro de la producción, ya que siempre se instalan 2, o incluso 3, bombas en paralelo para evitarlo.

A continuación se realiza el estudio SIL de las funciones instrumentadas asociadas a esta bomba. **(G-9 Bomba de corte)**

SIF.2 Proteger a la bomba G-9 de trabajar sin caudal.

Datos generales

Ref	Campo	Detalle
a)	Unidad	Coquer
b)	Tag SIF	SIF.2
c)	Servicio/equipo	Bomba G-9 A/B
d)	Enclavamiento asociado	SE-2
e)	Intención del diseño	Evitar trabajar sin líquido en la bombas G-9 A/B/C
f)	Elementos sensores	ZSL-1 y la pérdida de la condición abierta ZSH-1
g)	Elementos finales y acciones requeridas para llevar el proceso a estado seguro	Parada de las bombas G-2 A/B. Inhibición del arranque automático de la bomba G-2 C.
h)	Acciones de no seguridad del enclavamiento	-

Fallo peligroso en demanda

Ref	Campo	Detalle
a)	Causas	Fallo del controlador de flujo FC-1, situado a la entrada de agua de stripper al depósito, que cierra la válvula FV-1 durante un largo periodo de tiempo.
b)	Consecuencias no mitigadas del fallo de la SIF en demanda	Riesgo de daño mecánico a la bomba G-9 por cavitación. Pérdida de eficiencia, debido al aumento de vibración. Picado y erosión de

Ref	Campo	Detalle
		impulsor. Deformaciones mecánicas como son la torcedura y deflexión de los ejes, daño en rodamiento y roces por la vibración radial, daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial, daños en los sellos. Ruido anormal. Corrosión. Se producirá fuga del fluido de trabajo al exterior (agua de corte) sin posibilidad de ignición, aunque por la presión tan elevada de descarga (más relevante que la alta temperatura) puede provocar daños graves a los operarios.
c)	Tiempo de seguridad del proceso	< 30 min.
d)	Safety Gap según las gráficas de riesgo sin capas de protección Independientes	
	SEGURIDAD PERSONAL	W2: Según la <i>Tabla 5</i> , para un fallo espurio de una válvula de corte (por fallo de aire de instrumentación), por lo que es un evento esperado en la vida de la planta.
	W 2 C 1 F - P - SG -	C1: Como consecuencias de una fuga al exterior, la lesión que puede provocar al operarios (según la <i>norma 1</i> para esta unidad sólo hay un operario) sería moderada. Se considera que sólo puede llegar a sufrir una lesión moderada por la fuga de agua a elevada presión.
	PROTECCIÓN MEDIOAMBIENTAL	E1: La fuga producida no afectaría fuera del establecimiento, aunque si tendría consecuencias mínimas como para que la Dirección de la planta tomara medidas.
	W 2 E 1 SG a	A1: Como se indicó en la <i>norma 2</i> de esta unidad, el coste de reparación de una bomba de agua de corte de tipo centrífuga aproximado para un fallo catastrófico sería superior a 10 ⁵ Euros, y como en caso no tenemos pérdidas por paro de producción ya que tenemos 2 bombas en paralelo para evitarlo, se cataloga como A1.
	PROTECCIÓN DE ACTIVOS	
	W 2 A 1 SG a	
e)	Salvaguardias y créditos IPL asociados	-
f)	SIL requerido según graficas de riesgo (considerando las IPLs):	SIL a
g)	SIL REQUERIDO	SIL a

Seguidamente se muestra una tabla con los resultados obtenidos en el estudio de determinación de SIL de las funciones instrumentadas para esta Unidad.

Enclavamiento	SIF	Descripción de Función Instrumentada de Seguridad (SIF)	SIL
SE-1	SIF.1	Protege a la bomba G-2 de trabajar sin caudal	1
SE-2	SIF.2	Protege a la bomba G-9 de trabajar sin caudal.	a

En estudio SIL de las bombas de esta unidad, se observa que el factor limitante es la protección de activos, es decir, el coste de reposición y pérdidas de producción por parada de la bomba.

Como se consideró en la norma 2 de esta unidad, el precio de reposición de la bomba de carga es mayor que el de la bomba corte, y esta es la consecuencia de la diferencia del nivel SIL obtenido.

Para la SIF.2 se ha obtenido un nivel SIL a. Esto quiere decir que no hay un requisito de seguridad especial. En la práctica significa que no se puede eliminar la SIF, pero que se



puede considerar (o no) implementarla mediante el controlador y los elementos sensores o como una alarma.

Por lo que un SIL1 para una SIF, como es el obtenido para la SIF.1 de estas bombas, indica que se debe estudiar la arquitectura propuesta para la función, para comprobar que la probabilidad de fallo bajo demanda es de 0.1 a 0.01 (de 1 de cada 10 a 1 de cada 100). En el cálculo de esta probabilidad, se introducen las pruebas periódicas y de mantenimiento a realizar a cada SIF. Debido a que es un SIL.1, es esperable que las pruebas periódicas coincidan con las paradas de la unidad. Todas estas pruebas deben estar específicamente documentadas para posteriormente ser auditables.



4.2.3 Estudio de Turbinas

Las turbinas tienen una peculiaridad frente a las demás máquinas analizadas, ya que una turbina siempre trabaja unida a una bomba o a un compresor, es decir, la potencia que genera la turbina sirve para comprimir, el gas o el líquido, en función de la máquina a la que esté conectada. Por lo que actualmente no se analiza en los HAZOP el fallo de la turbina ya que se considera el fallo del conjunto Turbina-Bomba (Ver el P&ID 13 del Anexo 1) o Turbina-Compresor (Ver el P&ID 12 del Anexo 1).

En este caso se analizará un HAZOP de una turbina tipo (Actualmente, la gran mayoría de turbinas utilizadas en la industria petroquímica son turbinas de vapor.)

HAZOP desarrollado de la Turbina

Analizando las desviaciones de los variables de proceso de la unidad utilización la técnica HAZOP de detección de peligros, basada en la utilización de palabras clave (No, Más, Menos,..) aplicada a los parámetros de proceso (Temperatura, Nivel, Caudal,..) y obteniendo sus desviaciones (Mas Caudal, Menos Presión,). Se desarrollan las consecuencias que dichas desviaciones provocan en la turbina, así como las causas que las producen y las salvaguardas instaladas para evitar y mitigar el suceso.

PRESION

MENOS PRESIÓN

Causas

1. Fallo en el suministro de vapor de alta presión.
2. Fallo del controlador de flujo FC-1 que cierra la válvula FV- .1

Consecuencias

Debido a la carencia de vapor, la turbina cesará de girar, llegando incluso a parar. No provocará daños en la turbina ni en el compresor o bomba asociados a ella, ya se detendrán también. Sólo se producirán pérdidas por la parada de funcionamiento de estas máquinas y por tanto de la unidad de trabajo.

Salvaguardas

Ya que no es un fallo, carece de salvaguardias.

MÁS PRESIÓN

Causas

1. Aumento descontrolado de la presión de suministro de vapor.

Consecuencias

Si se supera la presión de diseño de la turbina, puede producirse la rotura interna de los alabes, de las bridas y de la carcasa. Podemos tratarlo como daño



catastrófico de la turbina, así como fallo del proceso, por el mal funcionamiento de la bomba o compresor al que este conectado.

Salvaguardas

1. Controlador de flujo FC-1 que cierra la válvula de regulación FV-1.
2. Control de funcionamiento SC-1 en la turbina.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

CONCLUSIONES

Como se ha podido observar en el presente estudio, son varios los escenarios de riesgo generados en equipos dinámicos por desviaciones de las variables del proceso.

Dependiendo de la desviación peligrosa de la variable de proceso se pueden producir distintos grados de consecuencias sobre los equipos dinámicos. En algunos casos se producirán solo daños mecánicos y en otros se producirá la pérdida de contención de las sustancias peligrosas que manejan dando lugar a posibles incendios de charco (Pool Fire), explosiones o nubes tóxicas.

En el estudio se han analizado las causas que generan una desviación peligrosa de las variables de proceso así como las consecuencias que estas tienen en distintos equipos mecánicos (compresores alternativos, compresores centrífugos, compresores de anillo líquido, bombas centrífugas y turbinas de vapor)

En general los daños mecánicos que se producen en cada tipo de máquina son independientes de la sustancia que trasiegan siendo diferentes las consecuencias sobre las personas y el medio ambiente, dependiendo de la composición de estas siempre que el daño mecánico desencadene la pérdida de contención de la sustancia.

Para los **compresores** alternativos y centrífugos la primera causa de daños graves es el arrastre de líquidos al compresor. Se observa que el daño mecánico es equivalente en todos los casos siendo diferentes las consecuencias para las personas o medio ambiente en función de la sustancia que manejan. Sin embargo, esta desviación no genera ninguna situación peligrosa en compresores de anillo líquido diseñados para trabajar en estas condiciones.

La siguiente causa de fallo en compresores, es la elevada temperatura del proceso (provocada en muchas ocasiones por un aumento de presión), en este caso los cierres mecánicos sufren un gran desgaste, pudiéndose producir pérdida de contención de las sustancias peligrosas manejadas al exterior.

En tercer lugar como causa de fallo estaría la baja presión en la succión que impediría alcanzar la presión de descarga dando lugar a un excesivo calentamiento y daño mecánico sin dar lugar a fugas al exterior. Esta tercera causa es más relevante en compresores centrífugos que en alternativos, ya que se puede provocar el surge o flujo inverso.

Para evitar las consecuencias indicadas anteriormente, los compresores cuentan con salvaguardas de protección instrumentadas ante variaciones de variables fuera de los límites normales de operación. Existen funciones instrumentadas que protegen ante la llegada de líquido, ante una alta temperatura en la corriente de entrada y baja presión de la succión.

A cada función instrumentada se le ha asignado un nivel de SIL en función del riesgo existente de cada escenario. De este análisis realizado en compresores alternativos, centrífugos y de anillo líquido se obtienen las siguientes conclusiones:

- El nivel SIL de las funciones instrumentadas de seguridad en los compresores alternativos viene exigido por la necesidad de proteger a las personas. Como se ha indicado anteriormente el peor escenario es la llegada de líquido con el gas de proceso que exige un nivel de integridad SIL 1. La alta temperatura en la corriente de gas obligaría a incluir un sistema instrumentado de protección de nivel SIL 1 o SIL a en función del tipo de unidad. El grado de integridad requerido para la función de protección ante la baja presión en la succión sería un SIL a.
- Por el contrario, el nivel SIL de las funciones instrumentadas asociadas a los compresores centrífugos depende de la existencia de otro compresor instalado en paralelo. En todas las unidades analizadas se carece de un compresor de reserva por lo que la limitación viene determinada por la protección de activos, es decir, coste de reposición del compresor dañado y los costes por pérdida de producción que provoca el paro de la unidad. A pesar de ello, no se puede extrapolar esta conclusión ya que en las unidades que si que dispongan de este compresor de reserva, las limitaciones en cuanto a nivel de SIL vendrán determinadas por la protección a las personas. Por ello, en el estudio realizado no se observan diferencias en cuanto a las posibles desviaciones, ya que se obtiene un SIL 1 en todos los posibles fallos de proceso, trabajo con presencia de líquidos, alta temperatura y alta diferencia de presión entre la entrada y salida. Independientemente del SIL obtenido, el mayor daño para el compresor centrífugo es provocado por una elevada diferencia de presión, por lo que se instala un control anti-surge para recircular la salida y la entrada, y poder disminuir así esta diferencia.
- Para el compresor de anillo líquido, en la mayoría de las funciones instrumentadas se ha obtenido un SIL 1, siendo el parámetro limitante en el cálculo del nivel de integridad la protección a las personas como se ha visto en los compresores alternativos. El daño que sufre el compresor de anillo líquido es similar si trabaja con poco caudal de agua, si se aumenta la temperatura en succión o se baja la presión a la salida del sello. También cabe destacar que la obtención de un SIL a para un elevado nivel de líquido dentro del compresor, es debido a que solamente se puede dañar e incluso romper el motor que acciona al compresor que intenta arrancar estando parado, por lo que es una causa rápidamente solucionable. Independientemente del nivel SIL obtenido, la causa más determinante, por el poco tiempo que puede trabajar en estas circunstancias, es el fallo de líquido de make-up o alimentación a los sellos, lo que provoca un calentamiento y posterior rotura rápida de los cierres.

En cuanto a las **bombas** cabe destacar que las causas que pueden provocar su mal funcionamiento y consiguiente daño son únicamente un bajo nivel en el depósito de aspiración (cavitación) y un bajo caudal de trabajo, por lo que los sistemas instrumentados se diseñan para proteger ambos escenarios.

En la valoración de las consecuencias hay que tener en cuenta por un lado los daños en la propia bomba y por otro los posibles daños en caso de fuga externa. La bomba independientemente del fluido de trabajo, ya sea agua, HC o amina, sufre las mismas consecuencias de daño mecánico, ante cualquier desviación del proceso antes mencionada. Sin embargo los daños a los operarios y equipos cercanos, dependerán de las características de las sustancias (inflamabilidad, toxicidad) así como las condiciones de operación *Presión y Temperatura*.



Una fuga en bombas que manejan hidrocarburos (Diesel, gasolina....) puede provocar heridas graves e incluso la muerte del operador (por un Pool Fire o una explosión de vapor no confinada). En todos los casos el factor de protección de personas es determinante, siendo el nivel de SIL 1 el requerido para las funciones de protección.

En las bombas de alta presión que manejan Amina y Agua de lavado o Corte, el daño a los operarios es menos probable y más limitado. Por lo que el nivel de SIL vendrá determinado exclusivamente por la protección de los activos (daños mecánicos a la bomba y pérdidas de producción), siendo un nivel de integridad SIL a para estas funciones instrumentadas.

Los fallos más normales en **turbinas** vienen provocados por la pérdida del fluido motor (vapor) o por un aumento de la presión del mismo. En el primer caso, las turbinas no sufren daño ya que acaban deteniéndose con la única consecuencia de pérdida de producción. Si por el contrario, se aumenta mucho la presión de la corriente de suministro de vapor, las consecuencias para la turbina podrían ser catastróficas. Esta causa es improbable, ya que el suministro de vapor de refinerías es servicio garantizado, por lo que no es práctica habitual incluir SIF para proteger esta causa.

TRABAJO FUTUROS

La realización de trabajos futuros orientados al campo de la maquinaria petroquímica, podrían venir encaminados a:

- ❖ Ampliar el listado aumentando el número de unidades a analizar dentro del esquema de la *Figura 3*, así como de máquinas a estudiar.
- ❖ Estudiar la exigencia de cada bomba en la utilización de cierres simples o dobles, en función del producto tóxico bombeado, debido a la carencia de una normativa para ello.



6 BIBLIOGRAFÍA

1. *Compressors. Selection and sizing*

Royce N.Brown

2. *Pump. Handbook*

Igor J.Karassik, Joseph P.Messina, Paul Cooper, Charles C.Heald

3. *OREDA. Offshore Reliability Data*

INTEF Industrial Management

4. *Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment*

ANSA/API STANDARD 689

5. *Reciprocating Compressors. Operation Maintenance*

Heinz P. Bloch, John J. Hoefner

6. *A practical guide to compressor thecnology*

Heinz P. Bloch

7. *Steam turbine theory and practice.*

KEARTON William J.

8. *CENTRIFUGAL PUMPS. Design and Application*

Val S.Lobanoff, Robert R.Ross

9. *Documentos internos de la empresa.*

10. *HAZOP's del proyecto C-10 de REPSOL. (Ampliación de la Refinería de Cartagena)*

11. *SIL del proyecto C-10 de REPSOL. (Ampliación de la Refinería de Cartagena)*

Paginas web:

1. <http://www.sapiensman.com/neumatica/neumatica3A.htm> (26-11-2008)
2. http://web.usal.es/~tonidm/DEI_05_Bombas_compresores.pdf (28-11-2008)
3. http://www.mavainsa.com/documentos/7_compresores.pdf (02-12-2008)
4. <http://www.yeccancemiac.com/down/gral/teobomb.pdf> (10-12-2008)



ANEXO I (Representación de los P&IDs)

A continuación se adjuntan en el apartado de Anexos, todos los P&IDs referenciados a lo largo de la memoria.

INDICE DE P&ID

COMPRESORES

P&ID 1.- Unidad de hidrodesulfuración de Gasoleo (Compresor K-1 A/B)	190
P&ID 2.- Unidad de Gascón de Destilación (Compresor K-1).....	191
P&ID 3.- Unidad de Hidrocracker (Compresores K-1 A/B y K-2)	192
P&ID 4.- Unidad de Gascon de Coquer (Compresor K-1 A/B).....	193
P&ID 5.- Unidad de Recuperación de gases de antorcha (Compresor K-1 A/B/C/D).....	194

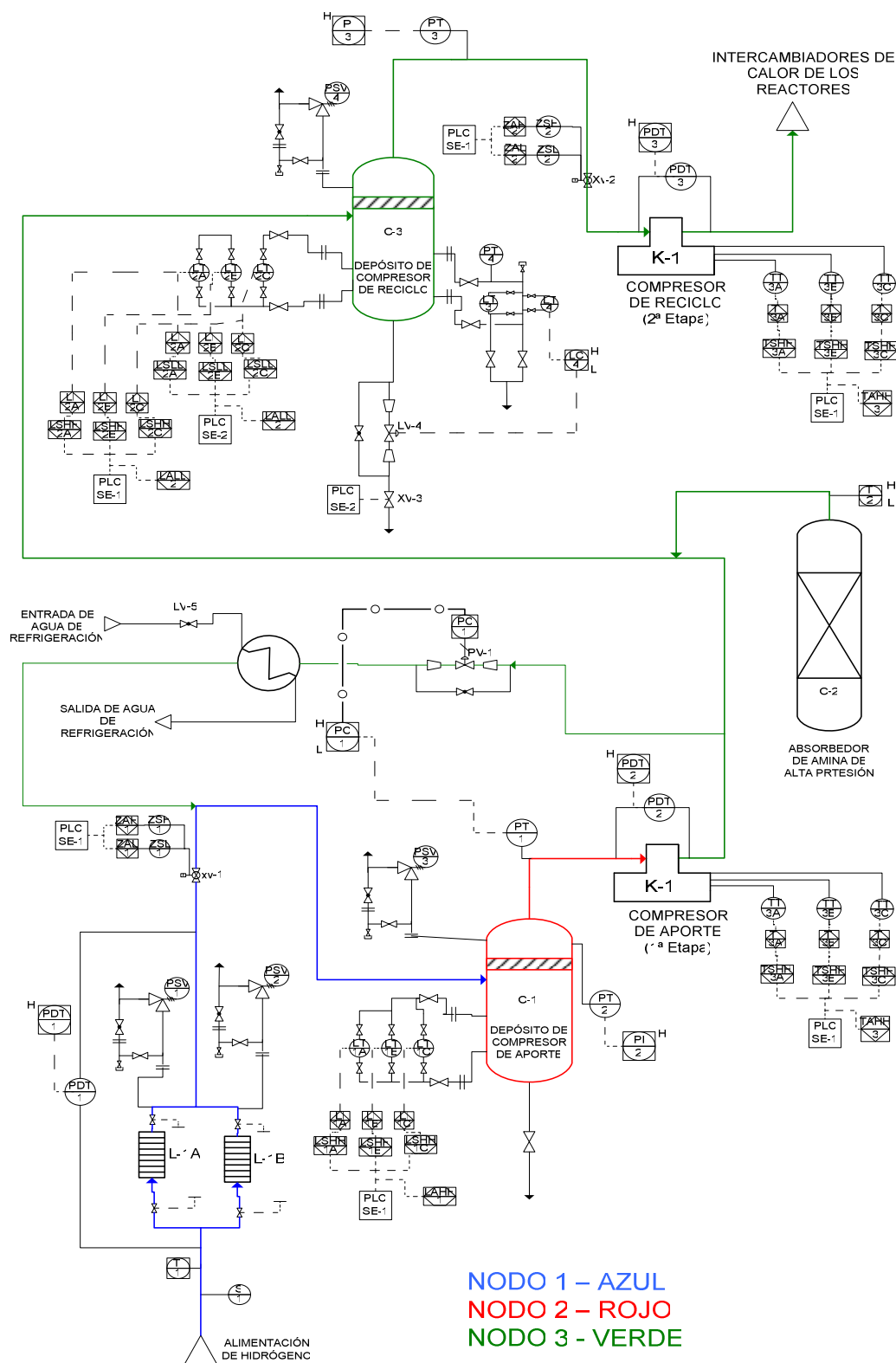
BOMBAS

P&ID 6.- Unidad de Hidrocracker (Bomba G-1 A/B)	195
P&ID 7.- Unidad de Hidrocracker (Bomba G-2 A/B)	196
P&ID 8.- Unidad de Hidrocracker (Bomba G-10 A/B)	197
P&ID 9.- Unidad de Hidrocracker (Bomba G-17 A/B)	198
P&ID 10.Unidad de Coquer (Bomba G-2 A/B/C)	199
P&ID 11.-Unidad de Coquer (Bomba G-9)	200

TURBINAS

P&ID 12.- Ejemplo tipo Turbina-Compresor	201
P&ID 13.- Ejemplo tipo Turbina-Bomba.....	202

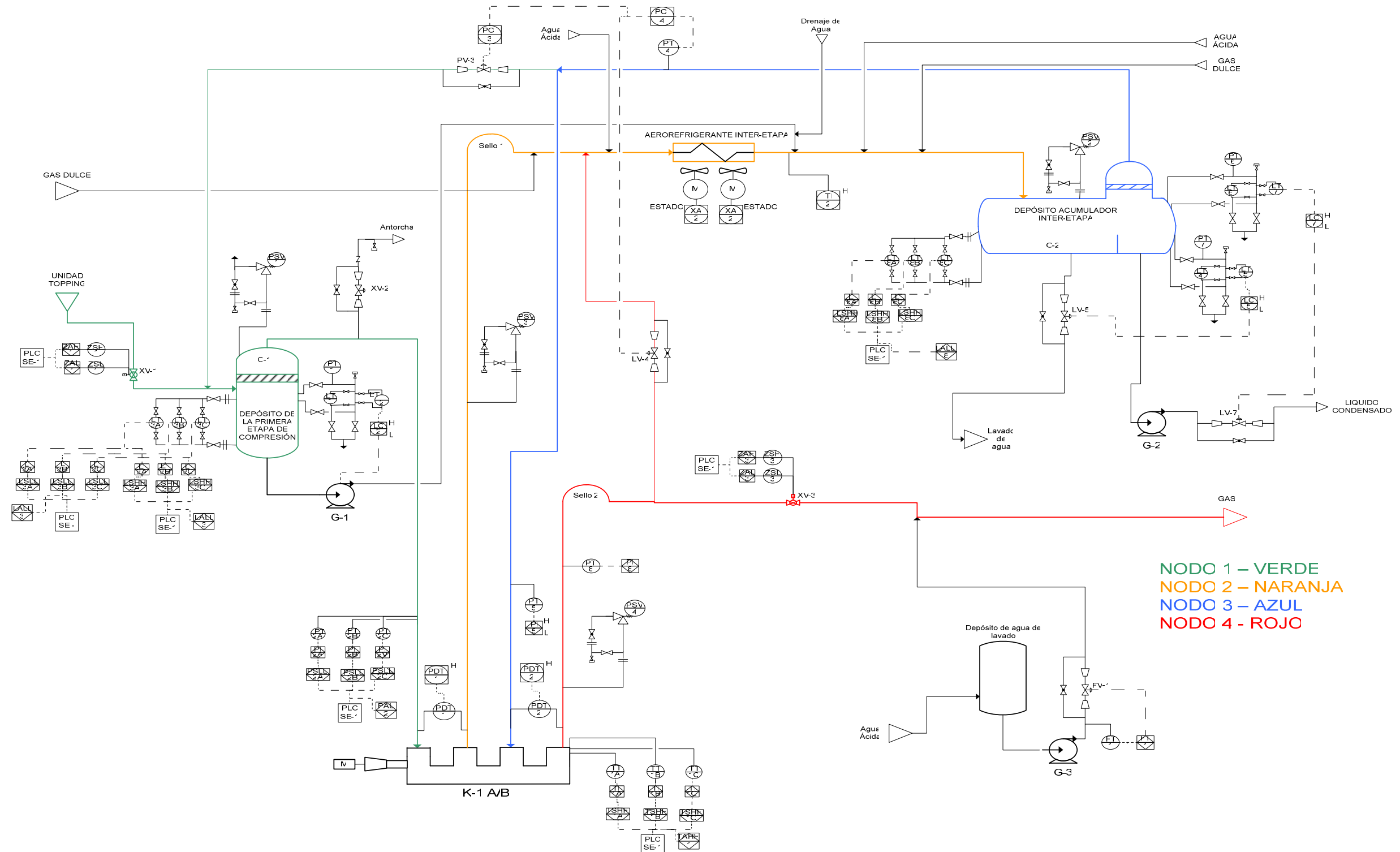
UNIDAD DE HIDRODESULFURACIÓN DE GASOLEO



P&ID 1.- Unidad de hidrodesulfuración de Gasoleo (Compresor K-1 A/B)



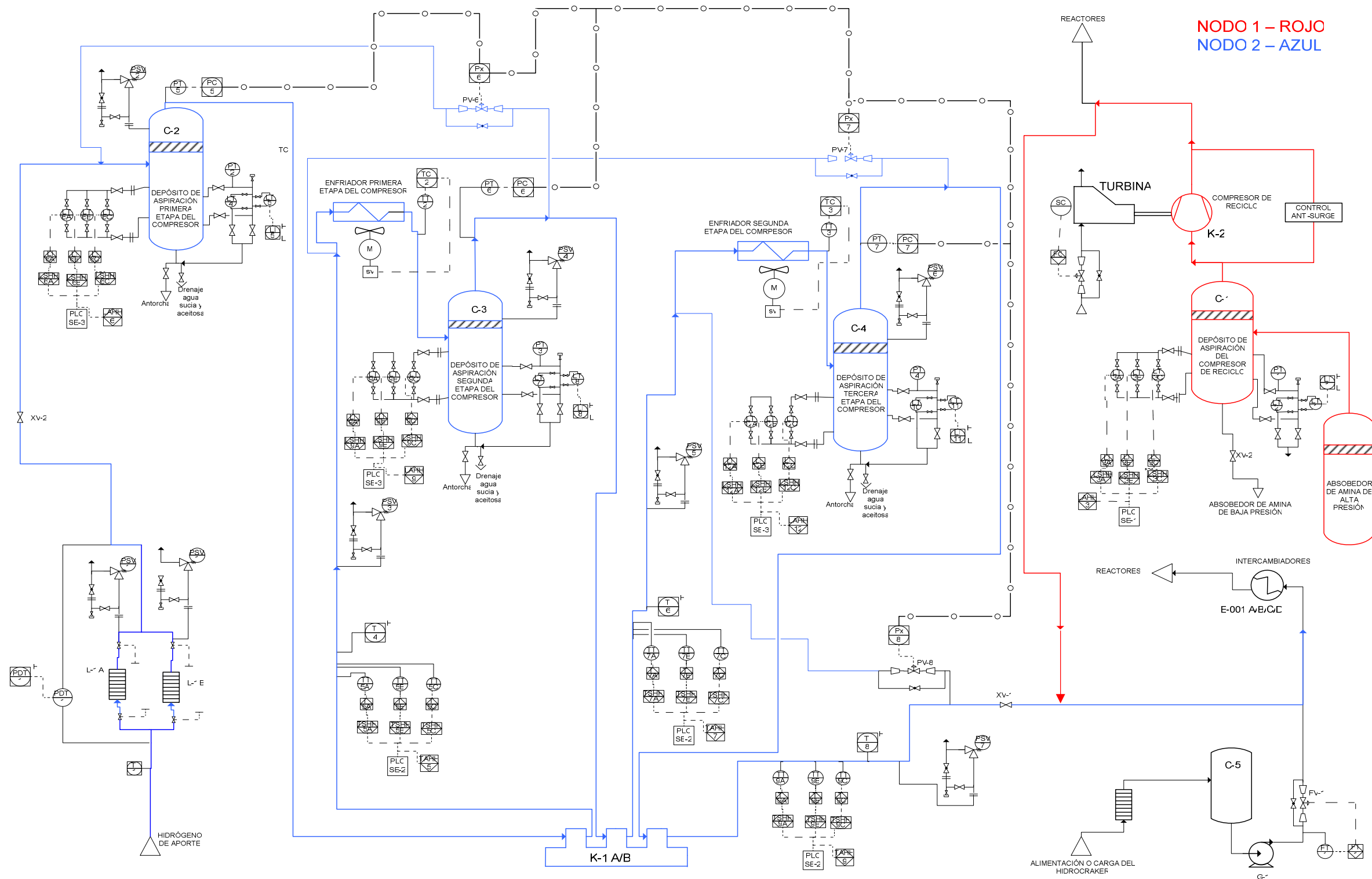
UNIDAD DE GASCON DE DESTILACIÓN



P&ID 2.- Unidad de Gascón de Destilación (Compresor K-1)



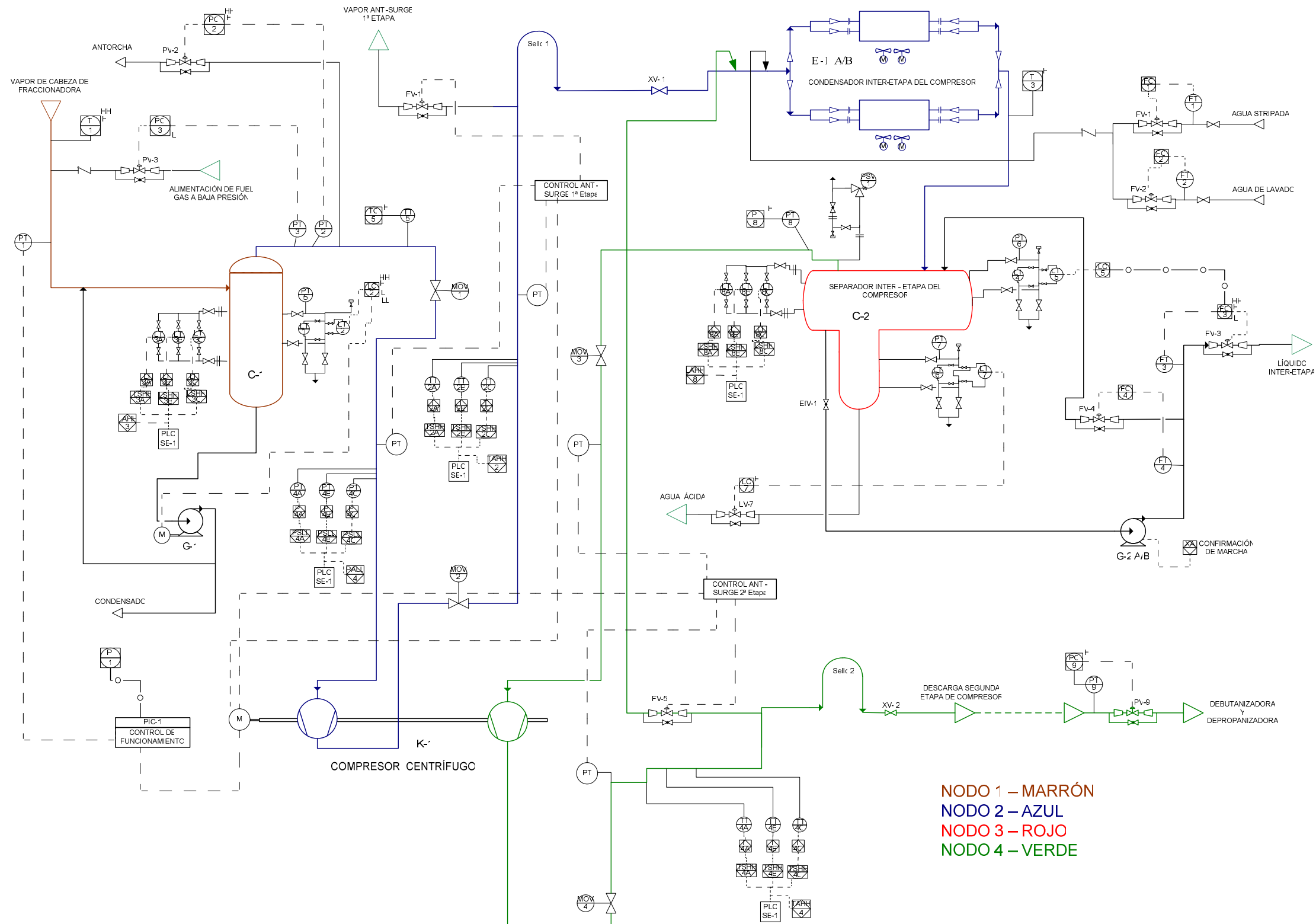
UNIDAD DE HIDROCRACKER



P&ID 3.- Unidad de Hidrocracker (Compresores K-1 A/B y K-2)

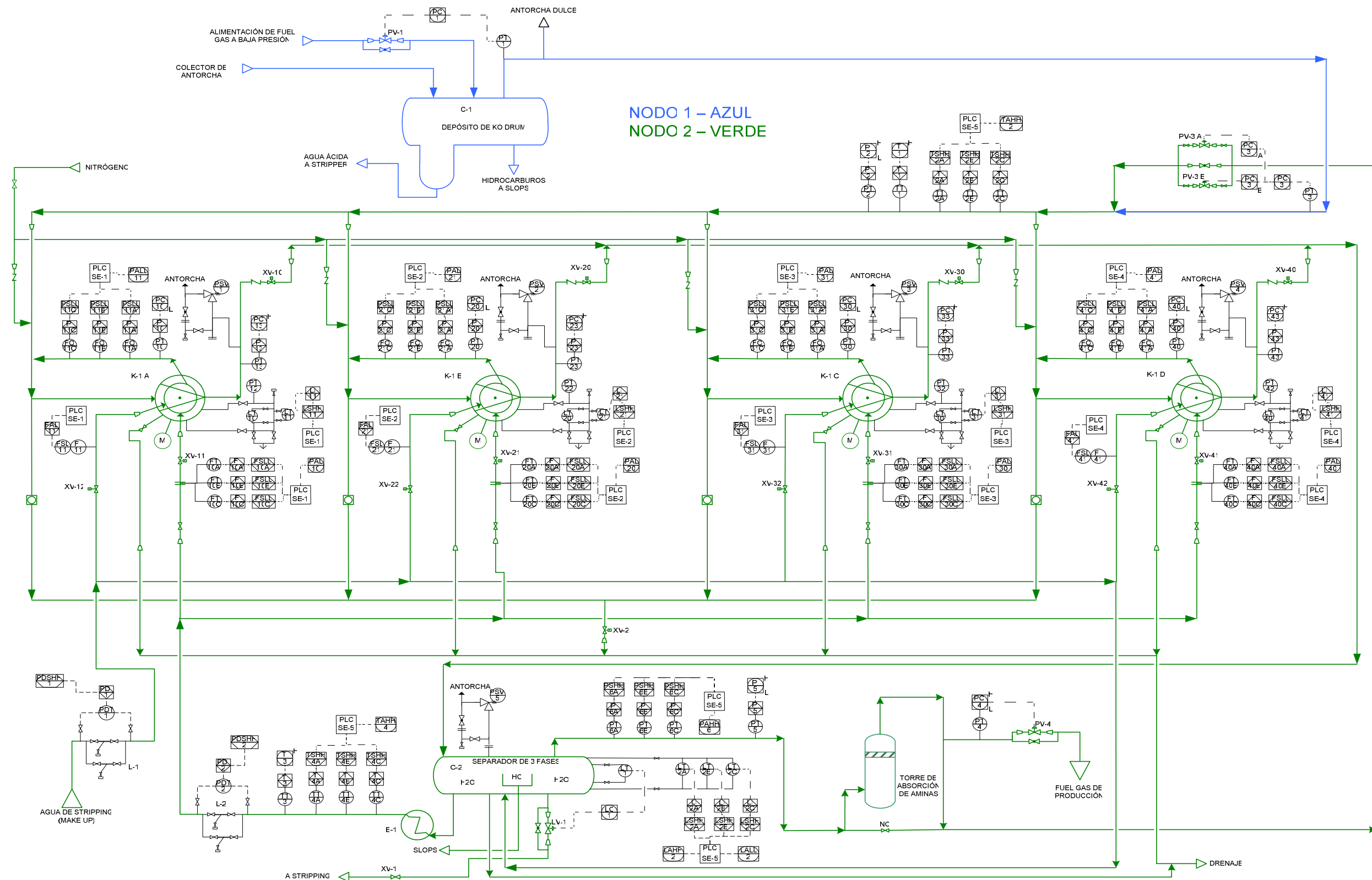


UNIDAD DE GASCON DE COQUER



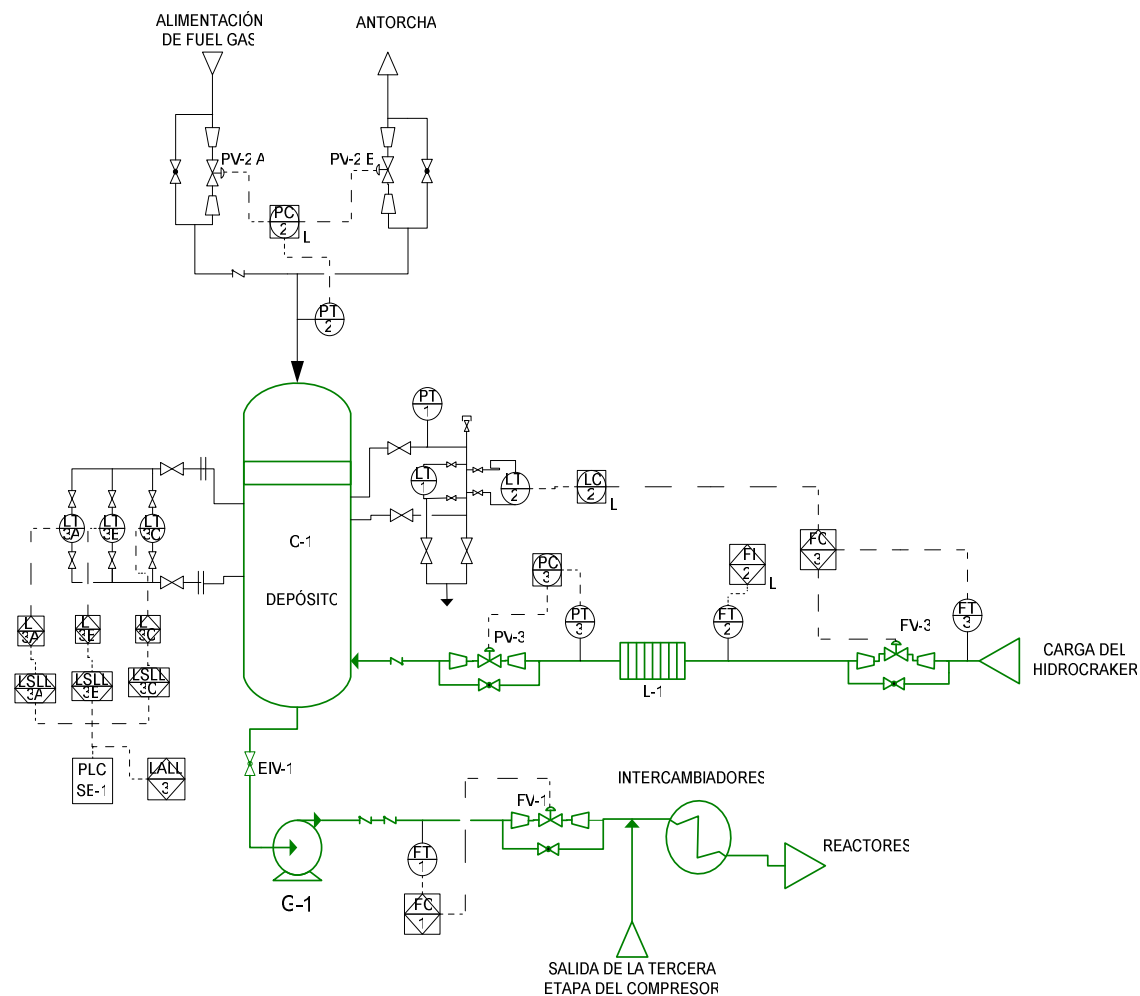
P&ID 4.- Unidad de Gascon de Coquer (Compresor K-1 A/B)

UNIDAD DE RECUPERACIÓN DE GASES DE ANTORCHA



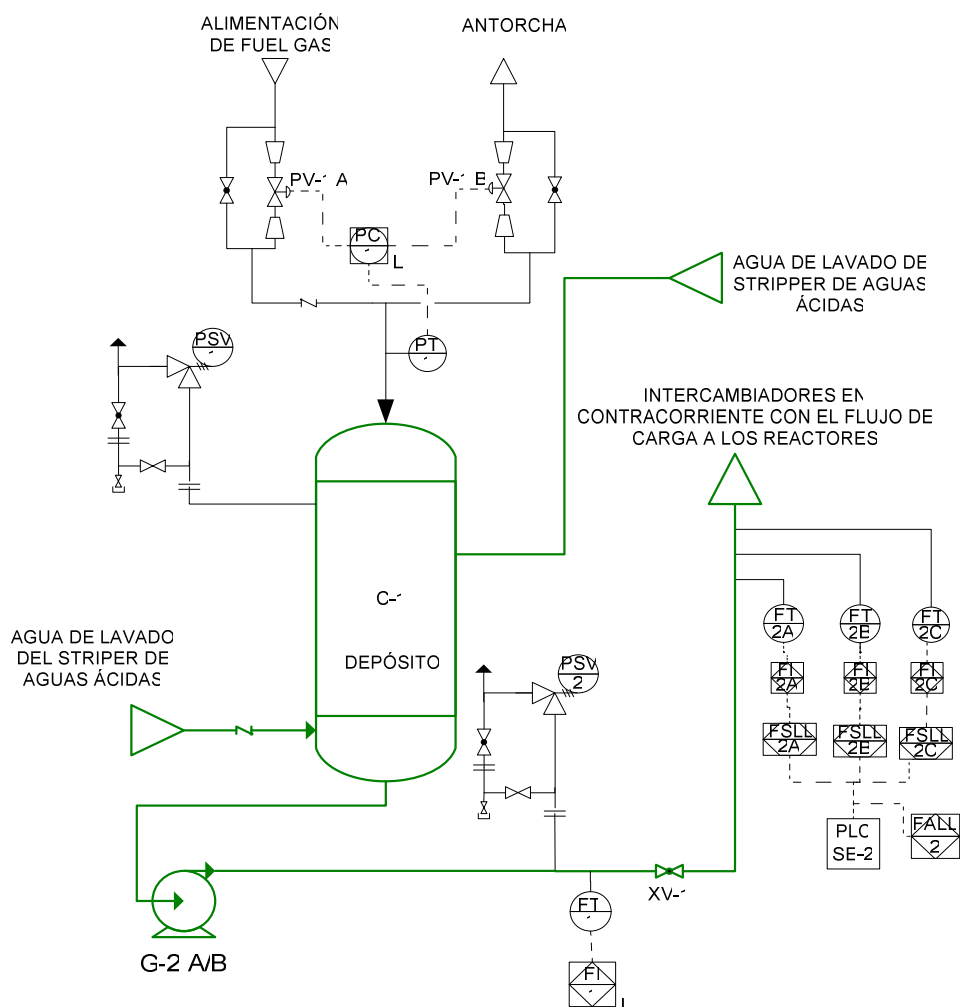
P&ID 5.- Unidad de Recuperación de gases de antorcha (Compresor K-1 A/B/C/D)

UNIDAD DE HIDROCRACKER (G-I BOMBA DE CARGA)



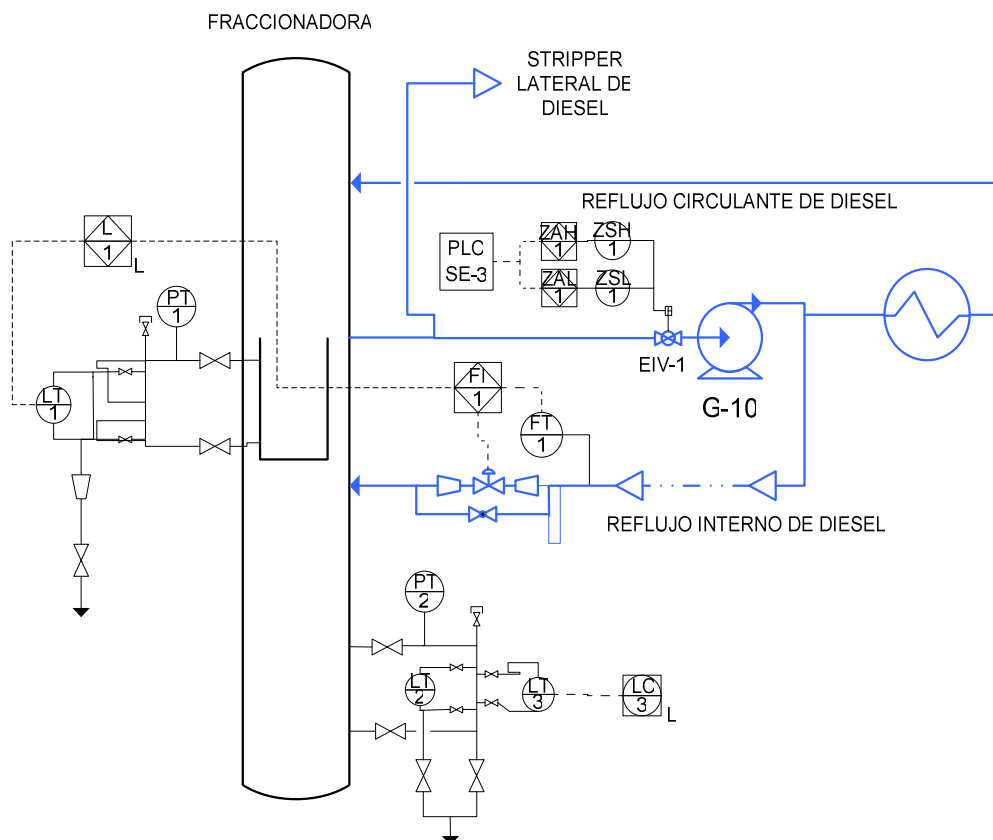
P&ID 6.- Unidad de Hidrocracker (Bomba G-1 A/B)

UNIDAD DE HIDROCRACKER (G-2 BOMBA DE LAVADO)



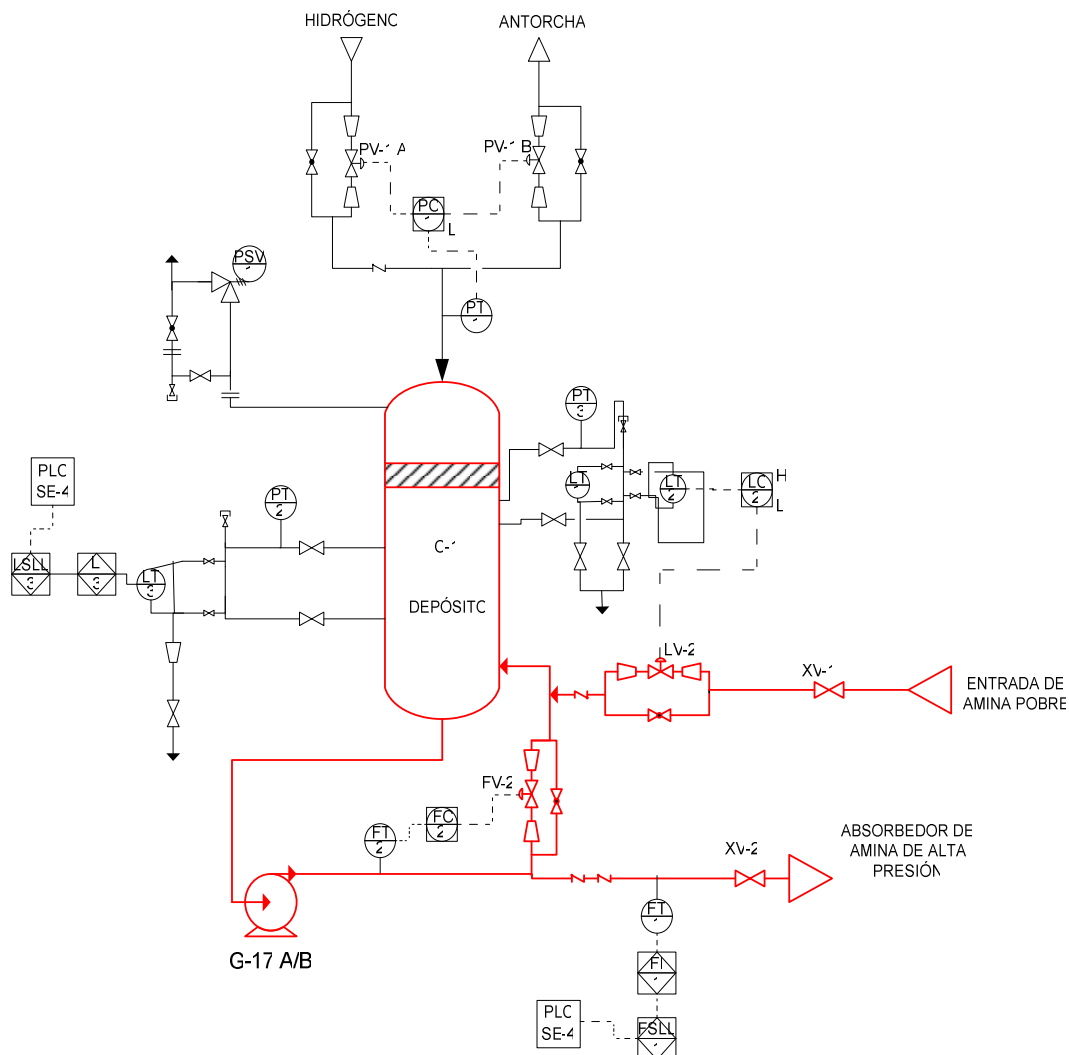
P&ID 7.- Unidad de Hidrocracker (Bomba G-2 A/B)

UNIDAD DE HIDROCRACKER (G-10 BOMBA DE REFLUJO DE DIESEL)



P&ID 8.- Unidad de Hidrocracker (Bomba G-10 A/B)

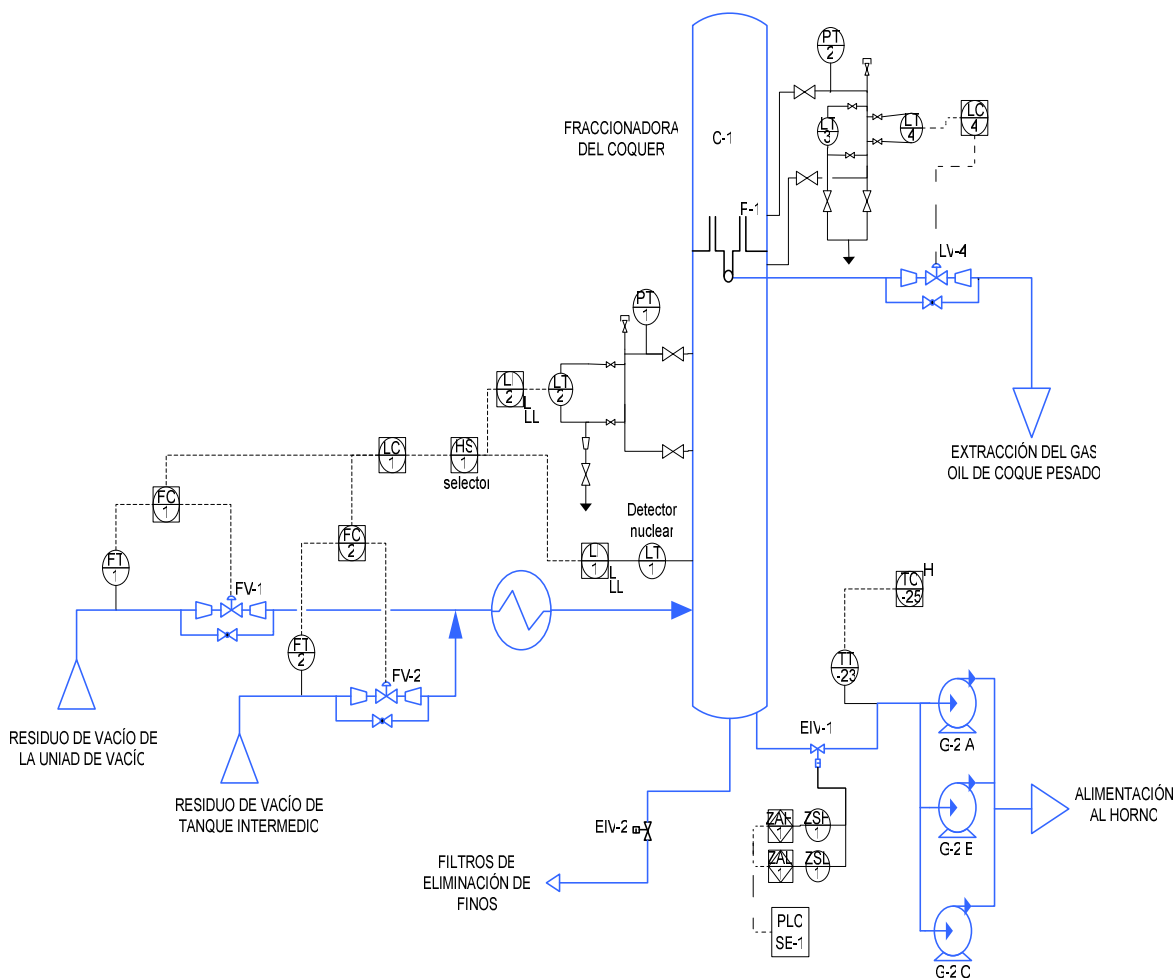
UNIDAD DE HIDROCRACKER (G-17 BOMBA DE AMINA)



P&ID 9.- Unidad de Hidrocracker (Bomba G-17 A/B)

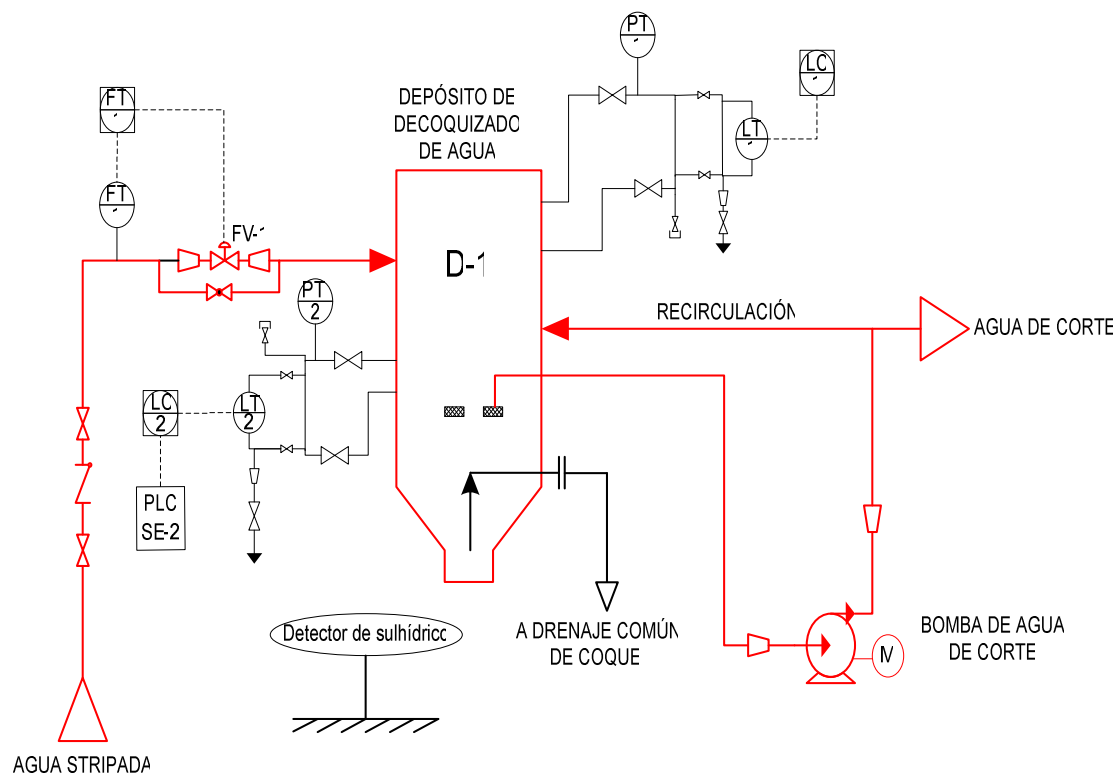
UNIDAD DE COQUER

(G-2 BOMBA DE CARGA AL HORNO)



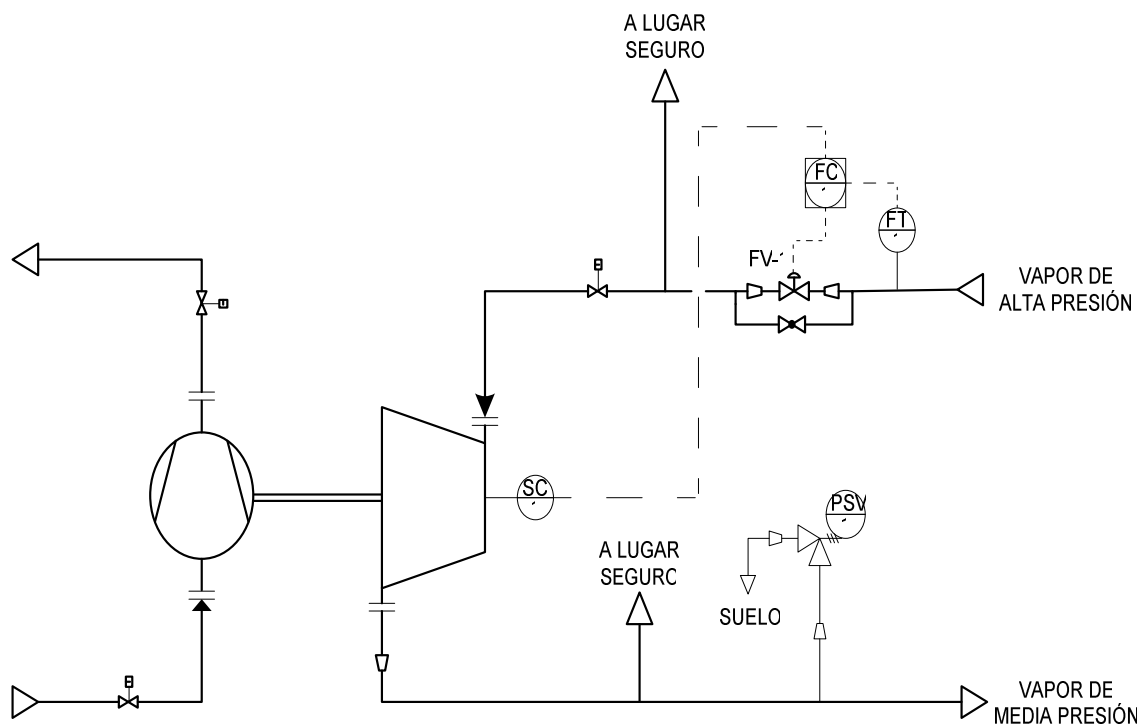
P&ID 10.Unidad de Coquer (Bomba G-2 A/B/C)

UNIDAD DE COQUER (G-2 BOMBA DE AGUA DE CORTE)



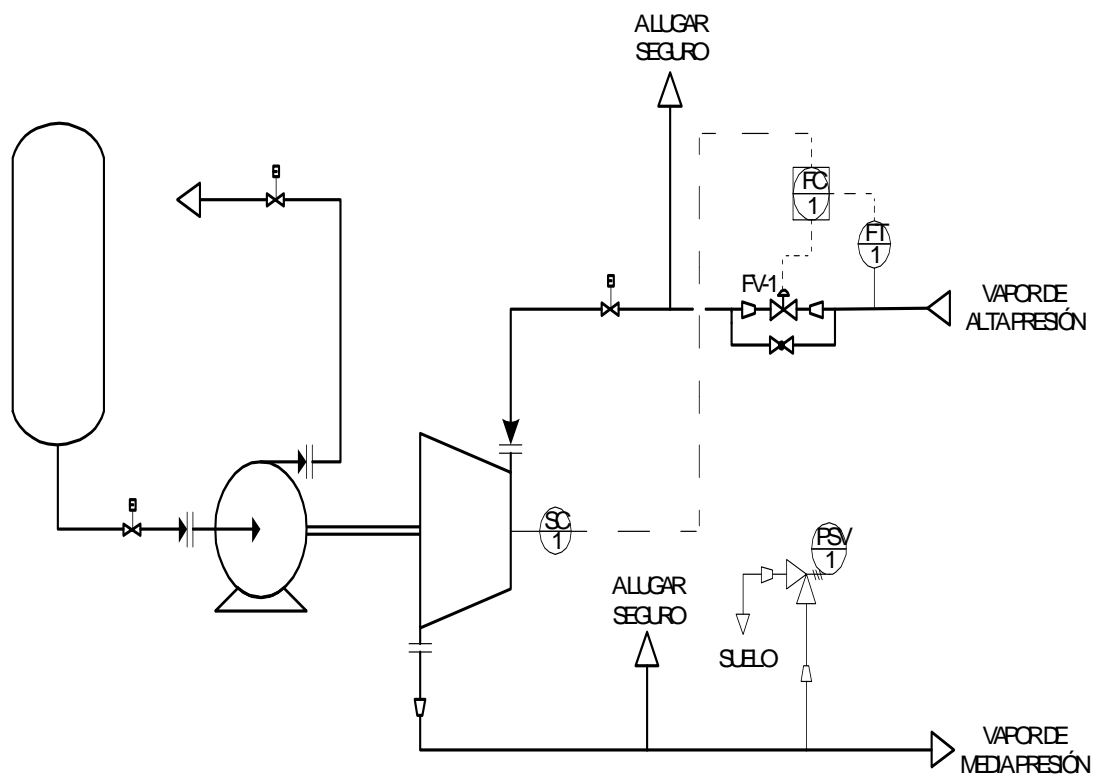
P&ID 11.-Unidad de Coquer (Bomba G-9)

TURBINA-COMPRESOR



P&ID 12.- Ejemplo tipo Turbina-Compresor

TURBINA-BOMBA



P&ID 13.- Ejemplo tipo Turbina-Bomba

ANEXO II (Estudio de probabilidad de fallos internos en compresores)

Aunque no sea el objeto del proyecto, a continuación se adjunta un ejemplo de un estudio de fallos internos a la máquina, concretamente a compresores centrífugos y alternativos accionados eléctricamente de diferente potencia de trabajo.

Los modos de fallo asociados a ambos tipos de compresores son:

- Lectura instrumental incorrecta
- Avería
- Falta de uniformidad en la salida
- *Filtración externa → Proceso medio*
- *Filtración externa → Utilidad media*
- Fallo en el arranque
- Fallo en la parada
- Elevada salida
- Filtración interna
- Escasa salida
- Pequeños problemas de servicio
- Ruido
- Recalentamiento
- Desviación paramétrica
- Parada en falso
- Estructura deficiente
- Desconocido
- Vibración

Antes de analizar la probabilidad de fallo debemos clasificar los modos de fallo en tres grandes grupos: crítico, degradado e incipiente. Un fallo crítico (también denominado catastrófico), se caracteriza por la rotura definitiva del elemento y máquina analizada. Un fallo degradado se produce por la incapacidad del material de mantener las propiedades idóneas de funcionamiento. Un fallo incipiente se produce al incrementar en gran medida y rápidamente el número de fallos a partir de un instante determinado.

El estudio de probabilidad de fallo se observa en las siguientes tablas, donde quedan reflejadas la probabilidad de ocurrencia de cada fallo, en función del tipo de compresor y del tipo de modo de fallo (crítico, degradado o incipiente).

Para compresores centrífugos, un estudio de probabilidad de modos de fallo sería:

		POTENCIA	MODO DE FALLO		Nº DE FALLOS
CENTRIFUGOS	ACCIONADOS POR MOTOR ELÉCTRICO	(100-1000) kW	CRÍTICO	Falta de uniformidad en la salida	2
				Fallo en el arranque	12
				Elevada salida	1
				Recalentamiento	1
				Parada en falso	11
				TOTAL	27
			DEGRADADO	Falta de uniformidad en la salida	3
				Filtración externa --> Proceso medio	3
				Filtración externa --> Utilidad media	2
				Fallo en la parada	1
				Filtración interna	2
				Ruido	1
				Otros	1
				TOTAL	13
			INCIPIENTE	Lectura instrumental incorrecta	24
				Falta de uniformidad en la salida	1
				Filtración externa --> Utilidad media	6
				Pequeños problemas de servicio	17
				Ruido	1
				Otros	10
				Estructura deficiente	2
				TOTAL	61
			TOTAL		101
	(1000-3000) kW	CRÍTICO		Falta de uniformidad en la salida	2
				Filtración externa --> Proceso medio	1
				Fallo en el arranque	12
				Otros	1
				Desviación paramétrica	1
				Parada en falso	20
				TOTAL	37
		DEGRADADO		Falta de uniformidad en la salida	1
				Filtración externa --> Proceso medio	2
				Filtración externa --> Utilidad media	8
				Fallo en la parada	1
				Elevada salida	1
				Filtración interna	5
				Escasa salida	3
				Otros	6
				Desviación paramétrica	5
				TOTAL	32
		PIEN		Lectura instrumental incorrecta	84
				Falta de uniformidad en la salida	2



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

				Filtración externa --> Proceso medio	1	
				Filtración externa --> Utilidad media	10	
				Filtración interna	1	
				Pequeños problemas de servicio	13	
				Otros	16	
				Estructura deficiente	2	
				Vibración	1	
				TOTAL	130	
				TOTAL		199
				(3000-10000) kW	CRÍTICO	Filtración externa --> Proceso medio
	Filtración externa --> Utilidad media	1				
	Fallo en el arranque	6				
	Filtración interna	4				
	Escasa salida	2				
	Parada en falso	10				
	Vibración	1				
	TOTAL	25				
	DEGRADADO	Lectura instrumental incorrecta	2			
		Filtración externa --> Proceso medio	2			
		Filtración externa --> Utilidad media	11			
		Elevada salida	2			
		Filtración interna	1			
		Escasa salida	3			
		Pequeños problemas de servicio	2			
		Ruido	2			
		Otros	13			
		Desviación paramétrica	1			
		Vibración	5			
		TOTAL	44			
	INCIPIENTE	Lectura instrumental incorrecta	35			
		Filtración externa --> Utilidad media	9			
		Pequeños problemas de servicio	3			
		Ruido	3			
		Otros	8			
		Desviación paramétrica	1			
		Desconocido	1			
		Vibración	6			
TOTAL		66				
TOTAL		135				



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

Para compresores alternativos, un estudio de probabilidad de modos de fallo sería:

		POTENCIA	MODO DE FALLO		Nº DE FALLOS
ALTERNATIVO	ACCIONADOS POR MOTOR ELÉCTRICO	(100-1000) kW	CRÍTICO	Lectura instrumental incorrecta	1
				Falta de uniformidad en la salida	2
				Fallo en el arranque	8
				Fallo en la parada	1
				Ruido	1
				Otros	1
				Parada en falso	13
				Estructura deficiente	1
				TOTAL	28
			DEGRADADO	Falta de uniformidad en la salida	8
				Filtración externa --> Proceso medio	1
				Filtración externa --> Utilidad media	1
				Escasa salida	40
				Otros	1
				Recalentamiento	4
				Desviación paramétrica	1
				Desconocido	6
				Vibración	1
				TOTAL	63
			INCIPIENTE	Lectura instrumental incorrecta	8
				Falta de uniformidad en la salida	2
				Filtración externa --> Proceso medio	6
				Filtración externa --> Utilidad media	9
				Pequeños problemas de servicio	5
				Ruido	3
				Otros	4
				Recalentamiento	2
				Desviación paramétrica	2
				Desconocido	17
				Vibración	1
				TOTAL	59
			TOTAL		150
	(1000-3000) kW	CRÍTICO	Avería		2
			Filtración externa --> Proceso medio		1
			Fallo en el arranque		2
			Ruido		1
			Parada en falso		1
			TOTAL		7



PROYECTO FIN DE CARRERA



Departamento de Ingeniería Mecánica

Departamentos de Máquinas y Seguridad Industrial

		(3000-10000) kW	DEGRADADO	Filtración externa --> Utilidad media	1
				TOTAL	1
			INCIPIENTE	Lectura instrumental incorrecta	2
				Filtración externa --> Utilidad media	3
				Pequeños problemas de servicio	2
				Ruido	1
				Otros	1
				Vibración	1
				TOTAL	10
			TOTAL		18
			CRÍTICO	Filtración externa --> Proceso medio	39
				Filtración externa --> Utilidad media	16
				Fallo en el arranque	1
				Fallo en la parada	1
				Escasa salida	140
				Recalentamiento	64
				Desviación paramétrica	46
				Parada en falso	16
		Estructura deficiente		4	
		Vibración		5	
		TOTAL		332	
		DEGRADADO	Filtración externa --> Proceso medio	23	
			Filtración externa --> Utilidad media	6	
			Fallo en el arranque	1	
			Fallo en la parada	2	
			Filtración interna	2	
			Escasa salida	52	
			Recalentamiento	19	
			Desviación paramétrica	64	
			Estructura deficiente	5	
			Vibración	3	
			TOTAL	177	
		INCIPIENTE	Lectura instrumental incorrecta	88	
			Filtración externa --> Proceso medio	14	
			Filtración externa --> Utilidad media	10	
			Pequeños problemas de servicio	229	
			Otros	4	
			Recalentamiento	6	
			Desviación paramétrica	20	
			Estructura deficiente	6	
Vibración	8				
TOTAL	385				
TOTAL		912			



Algunas conclusiones obtenidas a partir de las tablas estadísticas de fallo para un mismo régimen de trabajo en compresores centrífugos y alternativos, accionados por motor eléctrico a distintas potencias de funcionamiento serían:

- ❖ Por norma general, se producen un menor número de fallos en compresores centrífugos que en alternativos, excepto para una potencia de funcionamiento de 1000-3000 kW, en donde su eficiencia es inversa.
- ❖ A dicha potencia es la que compresor centrífugo tiene un mayor número de fallos, mientras que por el contrario, el compresor alternativo es el que trabaja mejor, ya que su número de fallos es muy inferior a cualquier otra posibilidad.
- ❖ El compresor alternativo para una potencia de funcionamiento de 3000-10000 kW tiene un número de fallos elevadísimo por lo que podemos asegurar que dicho compresor trabaja mejor a bajas potencias.
- ❖ El modo de fallo incipiente se produce con mayor frecuencia que el crítico y el degradado.
- ❖ Normalmente, en cualquier caso, siempre se produce fallos debido a las vibraciones. A medida que aumentamos las potencia, lo hace a su vez, los fallos debidos a esta circunstancia.
- ❖ Los fallos producidos por pequeños problemas en servicio sólo afectan a los modos de fallo incipiente.
- ❖ El número de fallos producidos por recalentamiento afectan en mayor medida a los compresores alternativos que a los centrífugos.
- ❖ Los problemas derivados del ruido afectan en mayor medida a los compresores alternativos cuando se trabaja a bajas potencias de funcionamiento, mientras que por el contrario, para los compresores centrífugos, el ruido afecta a elevadas potencias.
- ❖ Los fallos producidos por una falta de uniformidad en la salida afecta en mayor medida a bajas potencias para ambos tipos de compresores.